N° d'ordre 56 Année 1979

THÈSE

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

du Grade de Docteur-Ingénieur

par

CARLOS E. SEMINARIO

Ingénieur Universidad Nocional Agraria La Molina LIMA (Pérou)

Contribution à l'analyse du dépôt de particules en suspension dans un écoulement en milieux poreux

soutenue le 11 Juillet 1979 devant le Jury composé de

MM. DAT — Président

BORIES
CURIE
DEGALLIER
PIQUEMAL
THIRRIOT
— Examinateurs

N° d'ordre 56

Année 1979

THÈSE

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

du Grade de Docteur-Ingénieur

par

CARLOS E. SEMINARIO

Ingénieur Universidad Nocional Agraria La Molina LIMA (Pérou)

Contribution à l'analyse du dépôt de particules en suspension dans un écoulement en milieux poreux

soutenue le 11 Juillet 1979 devant le Jury composé de

MM. DAT — Président

BORIES
CURIE
DEGALLIER
PIQUEMAL
THIRRIOT

} Examinateurs

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

PRESIDENT D'HONNEUR

M. le Professeur ESCANDE
Membre de l'Institut

PRESIDENT

M. le Professeur MONTEL

VICE-PRESIDENTS

M. MARTY	Professeur
M. ENJALBERT	Professeur sans chaire
M. CONSTANT	Maître de Conférences
M. ANDRE	Maître Assistant

Directeur de l'E.N.S.A.T.	Monsieur le Professeur RAYNAUD
Directeur de l'E.N.S.C.T.	Monsieur le Professeur VOIGT
Directeur de l'E.N.S.E.E.I.H.T.	Monsieur le Professeur NOUGARO
Directeur de l'I.G.C.	Monsieur le Professeur GARDY

SECRETAIRE GENERAL

M. CRAMPES

PROFESSEURS HONORAIRES

M. ESCANDE - Membre de l'Institut
M. DIEHL
M. DUPIN

PROFESSEURS

M. ANGELINO	Génie Chimique
M. BUGAREL	Génie Chimique
M. DAT	Mécanique
M. GARDY	Génie Chimique
M. GRUAT	Mécanique
M. HOFFMANN	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. MARTY	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M. MONTEL	Chimie Appliquée et Chimie des Matériaux
M. NOUGARO	Mécanique
M. THIRRIOT	Mécanique
M. VOIGT	Chimie Minérale

.../.

PROFESSEURS SANS CHAIRE

Melle	BERDUCOU	Biologie et Biochimie Appliquées, Sciences Agronomiques
M.	CALMON	Biologie et Biochimie Appliquées, Sciences Agronomiques
M.	DABOSI	Chimie Appliquée et Chimie des Matériaux
M.	ENJALBERT	Génie Chimique
M.	FABRE	Mécanique
M.	FALLOT	Biologie et Biochimie Appliquées, Sciences Agronomiques
M.	GILOT	Chimie Appliquée et Chimie des Matériaux
M.	LEFEUVRE	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M.	MATHIEU	Chimie Analytique Appliquée et Chimie des Matériaux
M.	TRANNOY	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M.	TRUCHASSON	Mécanique

MAITRES DE CONFERENCES

M.	ALBERTINI	Sciences Agronomiques
M.	BAJON	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M.	BAUDRAND	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M.	BOURGEAT	Minéralogie, Géochimie, Pétrographie et Géologie Appliquée
M.	BRUEL	Informatique fondamentale et appliquée
M.	BUIS	Biologie et Physiologie végétale
M.	CANDAU	Biologie et Biochimie Appliquée, Sciences Agronomiques
M.	CONSTANT	Chimie minérale
M.	COSTES	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M.	COUDERC	Génie Chimique
M.	ECOCHARD	Biologie et Biochimie Appliquée, Sciences Agronomiques
M.	FOCH	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M.	GASET	Chimie Organique Appliquée et Chimie des Matériaux
M.	GOURDENNE	Chimie Physique
M.	LABAT	Biologie et Biochimie Appliquée, Sciences Agronomiques
M.	LENZI	Chimie APpliquée et Chimie des Matériaux
M.	MASBERNAT	Mécanique
M.	MATHEAU	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M.	MORELIERE	Electronique, Electrotechnique, Automatique
M.	TERRON	Zoologie et Ecologie

Liste établie le 24 janvier 1979

A Tula

A Daniel

AVANT — PROPOS

Nous devons à la haute bienveillance du Ministère de l'Education Nationale du Gouvernement Français et, tout particulièrement du C.R.O.U.S. de Toulouse, d'avoir pu effectuer ce travail ; nous les en remercions bien vivement.

Nous remercions Monsieur le Professeur NOUGARO, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse, qui a bien voulu m'accueillir au sein de l'Institut de Mécanique des Fluides.

Nous apprécions particulièrement son soutien moral et économique dans les derniers mois qui ont été si difficiles.

Nous prions Monsieur DAT, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse, d'accepter nos remerciements pour l'honneur qu'il nous fait de présider notre jury.

Ce n'est pas sans émotion que nous exprimons à Monsieur PIQUEMAL, Directeur de Recherche au C.N.R.S., le témoignage profond de notre reconnaissance. Malgré ses charges multiples, il a su - par sa grande compréhension et sa compétence - guider de près notre travail et nous donner confiance dans les moments les plus difficiles.

Nous adressons nos plus profonds remerciements à Monsieur CURIE, Lauréat de l'Institut, pour l'aide efficace et les conseils précieux qu'il nous a constamment prodigués durant nos années de recherche et qui a bien voulu faire partie de notre jury.

....

Nous tenons à remercier Monsieur BORIES qui nous a fait l'honneur de participer à notre jury. Sa présence au sein de la Commission d'Examen est, pour nous, d'une très précieuse valeur.

Nous sommes très heureux de compter parmi nos examinateurs Monsieur DEGALLIER, du B.R.G.M., et de pouvoir le remercier pour l'intérêt qu'il a porté à nos travaux.

Que Monsieur le Professeur THIRRIOT trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour l'honneur qu'il nous a fait en nous accueillant dans son équipe de recherche et pour son appui précieux tout au long de nos travaux.

Il nous est très agréable de pouvoir exprimer nos plus sincères remerciements à nos camarades du Laboratoire, en particulier :

- *Messieurs ALQUIER, GAUDU et HOA qui ont suivi de près et guidé amicalement cette étude,*
- *Messieurs BACON, BOMBAUD et POULAIN pour leur collaboration amicale.*

Nous adressons notre reconnaissance à Madame Marie-Hélène PUECH dont la patience et la compétence ont permis de mener à bien la dactylographie et la présentation de ce travail.

Bien que je sais que j'oublie beaucoup d'entre vous, je veux remercier le personnel de l'Atelier Mécanique, de l'Atelier Photographique et de l'Imprimerie.

S O M M A I R E

Pages

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I. SITUATION DU PROBLEME 3

I.1. Les mécanismes de rétention 3

I.2. Les méthodes d'analyse 7
I.2.1. Analyse dimensionnelle 7
I.2.2. Modélisation mathématique 11

I.3. Les techniques expérimentales 14

I.4. Principaux résultats acquis dans les études antérieures 18

I.5. Les objectifs de notre étude 19

CHAPITRE II. METHODE ET INSTALLATION EXPERIMENTALES 21

II.1. Principe de la méthode 21

II.2. Installation expérimentale 22
II.2.1. Le système hydraulique 22
II.2.2. Le système de mesures pour le milieu poreux discontinu 23
II.2.2.1. Mesure des pressions 23
II.2.2.2. Mesure des concentrations 23

II.3. Exécution d'une expérience 28
II.3.1. Essais préliminaires 28
II.3.1.1. Dérive du système de mesure 28
II.3.1.2. Etalonnage 28

II.3.2. Les différentes étapes de l'expérience 29

.....

CHAPITRE III. RESULATS EXPERIMENTAUX 31

III.1. Méthode d'exploitation des données expérimentales obtenues sur le milieu poreux discrétisé 31
III.1.1. Obtention des courbes de rétention 31
III.1.2. Passage d'une colonne discrétisée à une colonne continue 35

III.2. Valeur des paramètres expérimentaux (milieu poreux continu et discontinu) 35

III.3. Résultats pour le milieu poreux discontinu 38
III.3.1. Courbes de concentration 38
III.3.2. Bilans de masse 40
III.3.3. Courbes de rétention $\sigma_t(x)$ 43
III.3.4. Courbes de rétention $\sigma_x(t)$ 44
III.3.5. La formation du gâteau à l'entrée des galettes et ses conséquences 45

III.4. Résultats pour le milieu poreux continu 47

III.5. Conclusion 48

CHAPITRE IV .APPROCHE GLOBALE DU DEPLACEMENT D'UNE SUSPENSION DANS UN MILIEU POREUX 49

IV.1. Motivation de la démarche 49

IV.2. Détermination du noyau de convolution 50

IV.3. Résultats 51

IV.4. Conclusion 52

CONCLUSION 53

BIBLIOGRAPHIE 55

ANNEXE (FIGURES 1 à 41) 59

N O T A T I O N

a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4	constantes
d_m	diamètre des grains du milieu poreux
d_s	diamètre des particules de la suspension
g	accélération de la pesanteur
k	probabilité de rétention par unité d'épaisseur
k'	probabilité de rétention d'une particule par unité de temps
p	constante
t	temps
t'	valeur particulière de t
x	cote d'un point du milieu poreux compté à partir de la limite supérieure (distance à la face d'entrée).
C(x,t)	concentration volumique de la suspension
D	coefficient de diffusion de la suspension
G	nombre de décantation $G = \frac{(\rho_s - \rho) d_s^2 \cdot g}{\rho \nu \cdot V}$
Re	nombre de Reynolds $Re = \frac{V \; d_m}{\nu}$
S	section de la colonne de milie poreux
T	valeur particulière de t
V	vitesse de Darcy de la suspension

.....

α , β , γ , δ	constantes
ε	porosité du milieu poreux
θ	âge de la rétention
λ	coefficient de filtration
μ	viscosité dynamique du fluide
ν	viscosité cinématique du fluide
ρ_f	masse spécifique du liquide
ρ_s	masse spécifique de la suspension
σ	rétention du milieu poreux : rapport du volume de particules arrêtées contenues dans le volume élémentaire du milieu poreux.
τ	valeur particulière de t
Γ	somme des concentrations volumiques des particules immobilisées et en mouvement.

INTRODUCTION

Le phénomène de dépôt dans un milieu poreux de particules en suspension dans un liquide se manifeste dans divers cas.

Dans la nature d'abord. Il se produit dans les nappes phréatiques qui sont en contact avec les rivières dont l'eau est constamment chargée. Les dépôts influencent les transferts entre la nappe et la rivière.

Dans les opérations menées par l'homme. Elles sont très diverses ; on peut citer quelques-unes sans chercher à être exhaustif :

- la recharge artificielle des nappes phréatiques,
- l'exploitation des gisements pétrolifères,
- le génie chimique pour la séparation par filtration d'un solide du liquide qui le porte,
- le traitement des eaux à usage domestique.

Des études ont déjà été faites sur le sujet. Nous donnons, dans le Chapitre I, l'essentiel des résultats qui ont été obtenus. Les différents auteurs ont en général la même approche du problème. Elle consiste à faire un certain nombre d'hypothèses sur les phénomènes, à bâtir à partir de celles-ci une théorie puis à exécuter des expériences. Celles-ci permettent de vérifier la validité des modèles théoriques et implicitement des hypothèses. Elles permettent également

d'obtenir les valeurs numériques, généralement adimensionnelles, des nombres qui caractérisent les phénomènes.

Les résultats dont on dispose sont incomplets ; d'autre part, l'approche trop globale du dépôt ne permet pas d'analyser les phénomènes. De ces considérations, résultent les travaux que nous avons entrepris : ils se situent dans le prolongement de ceux que l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse consacre à ce thème depuis quelques années et dont l'objectif est double :

- d'une part, développer l'analyse systématique de l'influence des nombres qui déterminent la rétention en milieu poreux ;

- d'autre part, mieux connaître l'évolution de cette rétention en déterminant sa valeur locale.

L'expérience et la méthodologie d'analyse jouent un rôle très important dans la direction qui est ainsi définie. C'est pour cela que nous avons été conduits à examiner de nouvelles méthodes , celles dont on dispose actuellement n'étant pas adaptées à cette orientation des travaux du laboratoire.

Notre travail apparaît donc comme une recherche de voies nouvelles d'analyse du dépôt en milieu poreux.

CHAPITRE I

SITUATION DU PROBLEME

I.1. LES MECANISMES DE RETENTION

Les particules en suspension dans un milieu poreux sont retenues par la matrice poreuse sous l'action combinée de plusieurs mécanismes. Il paraitraît donc intéressant d'analyser chacun d'eux pour faire ensuite une synthèse permettant de déterminer la capacité de rétention d'un milieu poreux donné vis à vis d'une suspension. Cette approche pourrait être envisagée si elle ne nécessitait une analyse microscopique extrêmement complexe qui, en toute rigueur, s'appuyerait simultanément sur les aspects déterministes et statistiques du phénomène . Les résultats risqueraient d'être décevants et on préfère, dans ces conditions, utiliser des méthodes d'étude plus globales mais qui permettent néanmoins de résoudre convenablement les problèmes, comme cela se pratique habituellement quand on traite d'écoulements en milieu poreux.

Une connaissance qualitative des phénomènes générant la rétention demeure néanmoins nécessaire pour développer les méthodes d'étude que nous avons qualifiées de globales et interpréter leurs résultats.

Une particule portée par un fluide circulant dans un milieu poreux est soumise à des forces qui provoquent son entraînement , pour qu'elle s'immobilise dans la matrice poreuse, il est nécessaire qu'elle rencontre des conditions annulant ces forces.

Les conditions peuvent être créées dans des sites dans la matrice poreuse. On distingue (figure 1) :

. Les sites de surface. La particule vient en contact avec la surface d'un grain et s'y maintient.

. Les sites de crevasse. La particule est bloquée entre les surfaces convexes de deux grains.

. Les sites de retreint. La particule est retenue à l'entrée d'un pore de dimensions inférieures à la sienne.

. Les sites de caverne. Il s'agit de petites poches qui ne sont que peu ou pas affectées par l'écoulement et dans lesquelles se déposent des particules.

Les forces qui assurent l'immobilisation d'une particule dans un site favorable sont de diverses origines :

. Forces hydrodynamiques. Lorsqu'une particule est immobilisée à l'entrée d'un retreint, l'écoulement qui l'environne crée une force qui tend à la maintenir en place en position de "pont".

. Forces de contact. Le contact entre une et ou plusieurs particules et les grains du milieu poreux peut être tel que les forces de contact seraient supérieures aux forces hydrodynamiques auxquelles sont soumises les particules et qui auraient tendance à entraîner ces dernières.
Ces forces peuvent être d'origine :

- mécanique (frottement),

- physicochimique. Des liaisons chimiques peuvent se former dans certains cas particuliers.

- électrique * : forces de VAN DER WAALS.

Pour qu'une particule s'arrête, il est nécessaire qu'elle pénètre dans un site favorable. Elle peut y être conduite :

. par interaction directe.

. par inertie: par leur inertie, les particules solides peuvent ne pas suivre rigoureusement les lignes de courant de l'écoulement. Leur déviation les entraîne dans un site favorable à la capture.

. par sédimentation : lorsque la masse volumique des matériaux composant la particule est supérieure à celle du liquide, à la vitesse imposée par les conditions de l'écoulement s'ajoute celle qui résulte de l'action de la pesanteur. Il y a divergence entre les trajectoires des particules et du fluide qui favorise la pénétration des particules dans les sites de capture.

. par migration latérale : une particule sphérique , placée dans un écoulement à gradient de vitesse, est mise en rotation (effet Magnus) et soumise, de ce fait, à une force qui déplace la particule vers les grains dans le cas de particules plus lourdes que le fluide dans un écoulement vertical descendant. Les particules sont rarement sphériques ; l'effet Magnus se manifeste néanmoins mais les forces ont un caractère aléatoire. Il n'en demeure pas moins qu'elles ont pour effet de rendre possible l'introduction des particules dans les sites de rétention.

. par diffusion induite par le mouvement brownien.

---

* *. Toutes les forces électriques ne sont pas nécessairement attratives. Il peut en exister de répulsives.*

Les forces dont nous venons de parler ont des importances inégales ; il est possible d'apprécier la valeur pour certaines d'entre elles. Les forces de VAN DER WAALS, qui peuvent être calculées par la formule :

$$F_w = \frac{h_H \, d_s}{12 \, r^2}$$

où h_H est la constante d'HAMAKER et r la distance particule-grain, sont généralement négligeables au-delà de particules ayant un diamètre de 1 µ .

L'action de la sédimentation ne peut être négligée lorsque la taille des particules en suspension dépasse 30 à 40 µ sauf si la différence des masses volumiques du solide et du liquide est très petite ou la viscosité très élevée.

Les calculs montrent que, dans la pratique, les forces d'inertie peuvent être négligées.

La diffusion des particules n'est pas sensible pour des tailles inférieures à 0,5 ou 2 µm .

Il apparaît dans ce qui précède que la taille des particules joue un rôle important dans la rétention du milieu poreux. On peut à cet égard distinguer :

- les grosses particules de dimensions supérieures à 30 µm pour lesquelles les effets de volume sont prépondérants ;
- les petites particules dont la taille est de l'ordre de 1 µm pour lesquelles les effets de surface sont les plus importants ;
- les particules moyennes entre 3 µm et 30 µm sur lesquelles jouent les effets de surface et de volume ;
- les particules colloïdales dont la taille est inférieure à 0,1 µm pour lesquelles les phénomènes physicochimiques peuvent devenir prépondérants.

I.2. LES METHODES D'ANALYSE.

Ayant exclu l'analyse microscopique quantitative pour les raisons indiquées précédemment, deux voies d'études sont offertes : la première consiste à mettre en évidence les nombres adimensionnels qui caractérisent le phénomène et à déterminer, par voie expérimentale, l'influence de chacun d'eux ;
la deuxième repose sur une modélisation mathématique du phénomène en utilisant les lois classiques dont on dispose pour décrire les transferts dans les milieux poreux.

Comme on le verra ultérieurement, il n'y a pas opposition entre les deux méthodes mais complémentarité.

I.2.1. Analyse dimensionnelle

Les variables dont dépend le phénomène sont les suivantes :

$C(x,t)$	concentration volumique de la suspension
$C(o,t)$	concentration volumique de la suspension à l'entrée du milieu
x	distance à la face d'entrée
d_m	diamètre des grains du milieu poreux
d_s	diamètre des particules de la suspension
ρ_f	masse volumique du fluide.
ρ_s	masse volumique du solide de la suspension
μ	viscosité dynamique du fluide
V	vitesse de Darcy de la suspension

g	accélération de la pesanteur
D	coefficient de diffusion
ε	porosité du milieu poreux.

L'application de la théorie de l'analyse dimensionnelle conduit à écrire une relation de la forme (ISON et IVES [8]) :

$$F\left\{\frac{C(x,t)}{C(o,t)}, \frac{d_m}{x}, \frac{\rho_f V d_m}{\mu}, \frac{d_s}{d_m}, \frac{(\rho_s-\rho_f)d_s^2 g}{\mu . V}, \frac{\rho_s d_s^2 V}{\mu d_m}, \frac{d_m V}{D}, \varepsilon_0\right\} \qquad (I.1)$$

$$\frac{C(x)}{C(o)} = \Phi\left\{\lambda, \frac{x}{d_m}\right\} \qquad (I.2)$$

$$\lambda=\lambda\left\{\frac{\rho_f V d_m}{\mu}, \frac{d_s}{d_m}, \frac{(\rho_s-\rho_f)d_s^2 g}{\mu V}, \frac{\rho_s d_s^2 V}{\mu . d_m}, \frac{d_m V}{D}, \varepsilon_0\right\} \qquad (I.3)$$

$\frac{\rho_f V d_m}{\mu}$ est le nombre de Reynolds de l'écoulement exprimé classiquement avec la vitesse de Darcy et le diamètre des grains du milieu poreux.

$\frac{(\rho_s-\rho_f)d_s^2 g}{\mu V}$ est le rapport de la force de gravité qui agit sur une particule de la suspension diminué de la poussée d'Archimède à la force de trainée dans le fluide exprimée suivant la formule de STOKES ; nous l'appelons G ,nombre de décantation.

$\frac{\rho_s d_s^2 V}{\mu d_m} = \frac{d_s}{d_m} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f} \cdot \frac{\rho_f d_s V}{\mu}$. Ce nombre traduit l'influence du nombre de Reynolds défini à partir du diamètre de la particule.

$$\frac{d_m V}{D} = \frac{d_m}{d_s} \cdot \frac{d_s V}{D}$$

est un coefficient près le rapport de la convection à la diffusion des particules. Il s'agit en somme d'un nombre de PECLET.

Une estimation chiffrée des nombres adimensionnels dans les limites de variation des grandeurs qui les constituent permet d'en éliminer certains et de simplifier l'expression de λ :

$$\lambda = \lambda \{ \frac{d_s}{d_m} , \frac{\rho_f V d_m}{\mu} , \frac{(\rho_s - \rho_f) d_s^2 g}{\mu V} , \varepsilon_0 \} \qquad (I.3')$$

La plupart des auteurs , dès le début et tout au long des études sur le dépôt des suspensions en milieu poreux, ont admis que la variation de la concentration en fonction de la distance est proportionnelle à la concentration. Cette hypothèse,démontrée par HERZIG [6] , conduit donc à une loi de la forme très simple :

$$C(x) = C(o)\, e^{-\lambda \frac{x}{d_m}} \qquad (I.4)$$

λ est appelé coefficient de filtration dont la valeur peut être exprimée en fonction des nombres de (I.3') à partir d'expériences judicieusement conçues.

Dans cette approche par analyse dimensionnelle du problème, on a oublié un paramètre important qui est le facteur de forme des grains de la matrice poreuse et des suspensions. A notre connaissance, aucun auteur n'en fait état ; cette omission s'explique certainement par la difficulté de l'exprimer : on sent intuitivement qu'il joue un rôle important. Le bien-fondé de cette remarque a été mis en évidence par les travaux de H. ZAHAF [23] , dans des études liées au transport solide , domaine qui présente quelques points communs avec celui qui nous intéresse ici.

Une autre caractéristique devrait être prise en compte : il s'agit de la granulométrie de la suspension et des grains constituant la matière poreuse. Or, nous avons implicitement supposé - dans l'analyse dimensionnelle - que les grains du milieu poreux et les particules en suspension ont tous , dans leur catégorie, une taille unique. Dans la pratique, on peut trouver des milieux poreux artificiels (lits filtrants) réalisés de sphères ayant une courbe granulométrique très resserrée autour d'une valeur qui peut être prise, avec une bonne approximation, comme la dimension unique de l'ensemble des grains. Il en est tout autrement quand il s'agit des milieux naturels.

En ce qui concerne la granulométrie de la suspension, SAKTIVADIVEL [18] a estimé que les études pouvaient être menées avec des particules ayant un diamètre uniforme. Il justifie cette approche par le résultat de deux expériences :

- dans l'une, il fait traverser le milieu poreux par une suspension constituée de particules ayant des dimensions comprises entre 0.991mm et 1.168mm. ;
- dans l'autre, il prend deux groupes de particules de tailles différentes, les unes allant de 0.559 à 0.833 mm. , les autres de 0.991 à 1.168 mm. ; la proportion des secondes étant de 70%.

La comparaison pour les deux expériences des valeurs numériques du volume de particules retenues dans le milieu poreux et la durée totale au bout de laquelle on observe son colmatage montre que les particules les plus fines (de 0.559 mm. à 0.883 mm.) n'agissent pas sur le dépôt des particules les plus grosses. Ceci peut se traduire par le fait que la probabilité de dépôt des particules d'une taille donnée est indépendant des tailles des particules plus fines présentes dans la suspension. L'indépendance de la probabilité de dépôt facilite évidemment le traitement du problème.

Le résultat présenté par SAKTIVADIVEL est très intéressant par la simplification qu'il apporte mais il n'est pas tout à fait convaincant.

Des expériences complémentaires mériteraient d'être faites pour confirmer ou infirmer les résultats de SAKTIVADIVEL.

Remarque. Dans son analyse dimensionnelle, SAKTIVADIVEL considère dans les grandeurs qui influencent le dépôt de particules l'ouverture du pore. Ceci est fort judicieux mais difficile à utiliser dans la pratique. Nous n'en avons donc pas tenu compte.

I.2.2. Modélisation mathématique

Considérons (figure 2a,b), à la cote x, une tranche de milieu poreux de section S, d'épaisseur dx. En supposant le débit constant pendant l'intervalle de temps dt, on établit sans difficulté l'équation traduisant le bilan de masse (HERZIG [6]) :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\sigma + \varepsilon C] + V \frac{\partial C}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0 \qquad (I.5)$$

$\varepsilon (x,t)$ est la porosité du milieu poreux.

$$\beta \sigma = \varepsilon_0 - \varepsilon \qquad (I.6)$$

ε_0 étant la porosité initiale du milieu poreux ; β est un coefficient supérieur à l'unité qui traduit le fait que les particules retenues dans le milieu poreux ne sont pas intimement liées les unes aux autres. Elles piègent entre elles une certaine quantité d'eau, ce qui réduit le volume offert à l'écoulement et se traduit par une porosité apparente inférieure à ce qu'elle serait si les particules étaient parfaitement tassées.

HERZIG donne à l'équation (I.5) plusieurs versions simplifiées. Il considère d'abord que la diffusion des particules peut être négligée. Cette hypothèse est , dans la pratique, largement vérifiée comme cela a été dit dans le paragraphe précédent. On obtient :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\sigma + \varepsilon C) + V\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \qquad (I.7)$$

Une autre simplification peut être introduite en portant dans (I.7) σ tiré de (I.6), soit en supposant que β est constant :

$$\frac{1}{\beta}\frac{\partial}{\partial t}[\varepsilon(\beta C - 1)] + V\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \qquad (I.8)$$

Nous nous placerons, comme d'ailleurs l'ensemble des auteurs qui ont traité du même problème, dans le cas où $C << 1$, $\beta C << 1$ ou encore $\varepsilon C << \sigma$; (I.8) et (I.7) peuvent s'écrire dans ces conditions :

$$-\frac{1}{\beta}\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + V\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \qquad (I.9)$$

et

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + V\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \qquad (I.10)$$

Si on considère le cheminement d'un volume élémentaire de suspension dans le milieu poreux au fur et à mesure de sa progression, il abandonne une partie de ses particules. Il est nécessaire d'introduire l'âge de la suspension soit $\theta = t - \frac{\varepsilon x}{V}$;

(I.10) s'écrit :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + V \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{\theta} = 0 \qquad (I.11)$$

La probabilité de rétention d'une particule par unité de temps s'écrit :

$$k' = \frac{1}{\varepsilon C} \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \qquad (I.12)$$

La probabilité de rétention par unité d'épaisseur est :

$$k = \frac{1}{V C} \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \qquad (I.13)$$

En combinant (I.11) et (I.13), on obtient :

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{\theta} = - k C \qquad (I.14)$$

Cette relation rappelle celle qui a été utilisée par les auteurs dont les travaux ont précédé ceux d'HERZIG. Soit :

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{t} = - \lambda C \qquad (I.15)$$

λ est le coefficient de filtration . (I.14) et (I.15) ne sont équivalentes que si θ et t peuvent être confondues, ce qui n'est pas le cas pour le début du phénomène. λ ne représente pas alors la probabilité de rétention par unité de longueur.

On pose $k = k_o f(\sigma)$ où $f(\sigma)$ est la fonction de rétention. Dans la mesure où k et λ peuvent être confondus, on écrira $\lambda = \lambda_o f(\sigma)$. k_o et λ_o étant les valeurs respectives de k et λ lorsque $\sigma = 0$.

Les expressions qui précèdent permettent donc, en principe, de déterminer la réponse d'un milieu poreux à une suspension qui le traverse. Il suffit de connaître λ_o et $f(\sigma)$. Ces valeurs ne peuvent être obtenues que par voie expérimentale.

Il est intéressant de noter un résultat fourni par l'analyse qui précède. On peut écrire :

$$\frac{1}{C}\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{\theta} = \frac{1}{\sigma}\left(\frac{\partial \sigma}{\partial x}\right) \qquad (I.16)$$

soit :

$$\frac{C}{C_e} = \frac{\sigma}{\sigma_e} \qquad (I.17)$$

Ceci montre la relation d'affinité des profils pris au même âge de la rétention.

Les relations théoriques que nous venons d'établir sont utilisées après une transformation guidée par la technique expérimentale mise en oeuvre, pour interpréter les résultats des mesures dont le principal objectif est de déterminer $f(\sigma)$ en fonction des nombres qui caractérisent le phénomène.

I.3. LES TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Les expériences sur la rétention en milieu poreux de particules en suspension dans un fluide se situent, en Mécanique des Fluides, parmi les plus difficiles. Aussi, ne sera-t-on pas surpris de la diversité des méthodes qui ont été employées.

L'une des premières a consisté à prélever des échantillons de fluide le long du milieu poreux. Cette technique présente divers inconvénients. La structure du milieu poreux est perturbée par la présence des sondes de prélèvement, les hétérogénéités correspondantes affectent sensiblement les dépôts. Le prélèvement est fait à la même vitesse que celle de l'écoulement mais cette condition d'échantillonnage est difficile à réaliser et, par ailleurs, une certaine quantité de particules se dépose dans le tuyau, ce qui fausse les résultats.

Cette méthode a été rapidement abandonnée.

La méthode utilisée par ISON et IVES [8] consiste à disposer en parallèle une batterie de six colonnes de même section (5 cm. de diamètre), chacune portant une hauteur différente de milieu poreux, soit 2 cm - 4 cm - 6 cm - 8 cm - 10 cm. Les débits qui traversent les différentes colonnes sont constants et égaux. On recueille des échantillons de suspension à l'amont et à l'aval de chaque colonne ; on mesure la perte de charge aux extrêmités de chacune.

Les auteurs rapportent qu'il ne leur a pas été possible d'obtenir des résultats satisfaisants sur les colonnes de 2 et 4 cm. , malgré tous les efforts qui ont été faits pour y parvenir. Ils expliquent cet échec en estimant que, pour des lits de faible profondeur (c'est-à-dire inférieure à leur diamètre), la méthode de mise en place du milieu poreux, la présence de la grille qui le maintient en position ainsi que les parois se traduisent par des variations de la structure du milieu dans le sens horizontal et vertical. Etant donné que le taux de variation de la concentration est maximal à la surface du milieu poreux, de telles variations dans une colonne courte donnent des valeurs anormales de la concentration. Les explications, que nous avons rapportées quasi littéralement, ne nous satisfont pas compte tenu de notre propre expérience. Nous nous bornons à les contester pour ne pas anticiper sur les résultats quenous avons obtenus.

SAKTIVADIVEL [16], dans son installation expérimentale, opère en recueillant les particules qui traversent le milieu poreux et détermine ainsi le volume retenu dans la colonne. Il considère non pas la rétention mais la somme des concentrations volumiques des particules immobilisées et en mouvement * soit Γ . En posant $V\ \Gamma = Q$, l'équation de continuité (I.7) s'écrit :

$$\frac{\partial\ \Gamma}{\partial\ t} + \frac{\partial\ Q}{\partial\ x} = 0 \qquad \text{(I.18)}$$

Il admet une loi de la forme :

$$\frac{\partial\ Q}{\partial\ x} = -\ (\ \lambda_0 + \delta\ \Gamma\ )\ Q \qquad \text{(I.19)}$$

En éliminant Q entre les deux équations, on obtient :

$$\frac{\partial^2\ \Gamma}{\partial x\ \partial t} + (\ \lambda_0 + \delta\ \Gamma\ )\ \frac{\partial\ \Gamma}{\partial\ t} - \frac{\delta}{(\ \lambda_0 + \delta\ \Gamma)}\ \frac{\partial\ \Gamma}{\partial\ x}\ \frac{\partial\ \Gamma}{\partial\ t} = 0 \qquad \text{(I.20)}$$

La résolution de cette équation par calcul numérique se fait par essais successifs. Pour un couple de valeurs λ_0 et δ arbitrairement choisies, on détermine Γ , que l'on intègre sur toute la hauteur du milieu poreux, et la valeur ainsi obtenue est comparée à celle que l'on peut déduire de l'expérience. On modifie alors λ_0 et δ jusqu'à obtenir une bonne coïncidence entre la théorie et l'expérience.

SAKTIVADIVEL a tenté d'affiner cette analyse globale en

---

* *On ne considère donc pas ici la rétention mais l'ensemble des particules présentes dans le milieu poreux. En pratique, on peut considérer - sauf au début du phénomène - que le volume des particules retenues est bien plus grand que celui des particules en suspension.*

essayant de mesurer la rétention dans la colonne à partir de la variation de pression tout le long du milieu poreux. Pour cela, à partir de diverses hypothèses sur la circulation de la suspension et la formation du dépôt (circulation sous forme de canaux et dépôt autour de ces derniers), dépôt modifiant le rayon des particules du milieu poreux - donc de la perméabilité -, il a bâti des relations liant la perte de charge à la rétention du milieu poreux.

L'approche utilisée par SAKTIVADIVEL est caractérisée par l'arbitraire des hypothèses permettant d'interpréter les expériences. L'auteur s'impose à priori une loi linaire pour la variation de λ alors que certains autres ont trouvé que λ peut commencer par croître, passer par un maximum, puis décroître. Dans les deux cas, les valeurs obtenues pour λ_0 et α sont , de par la méthode de calcul, des sortes de valeurs "moyennes" sur l'épaisseur du lit. La détermination de la rétention le long du milieu poreux repose sur une phénoménologie qui traduit un peu trop schématiquement la complexité des dépôts. D'ailleurs, l'auteur observe que la méthode basée sur l'écoulement en canaux est satisfaisante seulement lorsque l'épaisseur du milieu poreux est très faible (nous aurons l'occasion de revenir sur cette observation à propos des résultats que nous présentons). La théorie, basée sur l'hypothèse d'une variation de la perméabilité,semble donner des résultats satisfaisants. Quoi qu'il en soit, cette méthode ne peut être appliquée qu'à des milieux poreux donnant des pertes de charge mesurables avec une bonne précision , ce qui exclut l'étude des milieux à forte perméabilité.

La méthode expérimentale développée par HERZIG [6] repose sur la détermination de la masse totale des particules qui se trouvent dans le milieu poreux. La mesure est déduite de l'atténuation , par les particules, du flux lumineux d'un faisceau qui traverse la colonne normalement à son axe. Un étalonnage préalable est nécessaire. La mise en oeuvre de ce procédé suppose que le milieu poreux est transparent et de faible épaisseur (diamètre de 20 mm. dans le montage de HERZIG). Ceci exclut l'étude de matériaux

naturels et limite la taille des grains du milieu poreux qui doit être petite devant le diamètre de la colonne.

A notre connaissance, aucune analyse "microscopique" des phénomènes de dépôt des particules n'a été entreprise si on veut bien excepter la tentative de TZOVARIDIS [22] . Ce dernier a utilisé un modèle analogique bidimensionnel constitué par deux plaques de plexiglas parallèles entre lesquelles sont déposés des "obstacles", d'épaisseur constante et égale à l'entrefer du modèle. Les obstacles sont sensés représenter les grains du milieu poreux ; leur forme a été déterminée par photographie d'une coupe de milieu poreux réel. L'intérêt de ce modèle réside dans la possibilité de visualiser sans problème le cheminement et le dépôt des particules; il est, de ce fait, un bon instrument d'analyse mais il ne peut évidemment fournir que des résultats qualitatifs.

TZOVARIDIS a également examiné le cheminement des particules dans des tubes capillaires simulant une suite de pores par une succession de retrécissements et d'élargissements.

I.4. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS DANS LES ETUDES ANTERIEURES.

Les études antérieures que nous avons examinées ont été, en fait, des propositions de méthodes d'étude assorties de quelques résultats obtenus souvent dans des cas particuliers. Cette observation s'explique essentiellement parce que les recherches ont été surtout inspirées par les lits filtrants utilisés à des fins industrielles. C'est notamment le cas chez HERZIG qui a pu développer une méthode de calcul prévisionnel des lits filtrants dans laquelle interviennent des paramètres qui sont déterminés par des mesures expérimentales. Dans ces conditions, on comprend que les auteurs ne se soient pas attachés à une analyse systématique de l'influence

des nombres sans dimensions qui influent sur la rétention d'un milieu poreux en tenant compte des limites pratiques de leur variation. C'est dans cette direction que se sont orientés les travaux de TZOVARIDIS qui n'a pas pu résoudre le problème dans son ensemble, étant donné son étendue, mais qui a pu apporter une contribution intéressante et originale à la quantification de la rétention en milieu poreux. Il a établi que la corrélation :

$$\frac{\lambda_o \ \nu}{(g \ d_s)^{1/2}} = f\ (R_e \ G^{-1/2}) \qquad (I.21)$$

donne une droite en échelles log-log. G est le nombre de décantation (appelé paramètre gravitationnel par TZOVARIDIS), λ est obtenu à partir de $C_s = C_o \ e^{-\lambda_o L}$, C_o et C_s étant respectivement les concentrations à l'entrée et à la sortie du milieu poreux de longueur L. λ est supposé constant. Il s'agit-là d'approximations très discutables.

I.5. LES OBJECTIFS DE NOTRE ETUDE

Ils viennent d'être implicitement indiqués dans le paragraphe précédent et tiennent compte de l'analyse critique des études antérieures.

En continuité avec l'orientation des travaux antérieurs faits à l'INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES, nous avons cherché à obtenir des lois qui permettent de prévoir la rétention d'un milieu poreux à partir des nombres qui conditionnent les phénomènes en les faisant varier dans les limites imposées par la pratique. Pour cela, nous avons été conduits à rechercher de nouvelles méthodes d'analyse, celles qui ont été précédemment utilisées ne nous ayant pas paru satisfaisantes pour réaliser l'objectif fixé.

CHAPITRE II

METHODE ET INSTALLATION EXPERIMENTALES

II.1. PRINCIPE DE LA METHODE

Faute de pouvoir mesurer la rétention le long de la colonne (ou d'avoir trouvé une méthode qui ne présente pas les inconvénients de celles qui ont été examinées dans le premier chapitre), nous avons tenté de développer une méthode qui s'en approche. Nous avons, pour cela, procédé par discrétisation, c'est-à-dire par découpage de la colonne de milieu poreux en un certain nombre de tranches. A l'intérieur de chacune d'elles, on détermine la quantité de matière retenue. Ce principe conduit à deux réalisations :

. La première consiste à déterminer la rétention à partir de l'enregistrement de la valeur de la concentration de la suspension à l'entrée et à la sortie de chaque galette. Dans ce cas, on intercale entre deux galettes successives de milieu poreux une galette non garnie à l'intérieur de laquelle on mesure la concentration instantanée de la suspension.

. Dans la deuxième, on maintient la continuité de la colonne de milieu poreux par juxtaposition des différentes galettes. Après injection de la suspension pendant une durée déterminée, on démonte la colonne, on extrait de chaque galette la suspension qui s'y trouve et on mesure sa masse. La variation en fonction du temps de la rétention s'obtient en réalisant une succession d'expériences de durée variable.

On passe d'une configuration à l'autre en éliminant les galettes non garnies.

II.2. INSTALLATION EXPERIMENTALE

Elle comprend deux parties principales :

- le système hydraulique,
- le système de mesures.

Le principe du montage est donné sur la figure 3 et sa réalisation apparaît sur la photographie de la figure 4.

II.2.1. Le système hydraulique

Il est constitué par (figure 3) :

- la colonne qui est une suite de galettes réalisées conformément au dessin d'exécution de la figure 5 où l'on distingue le tube de plexiglas de 127 mm. de diamètre intérieur terminé par deux brides de la même matière dans lesquelles ont été disposés des joints nécessaires à l'étanchéité du montage. Nous avons utilisé quatre galettes enserrant le milieu poreux entre lesquelles s'interposent trois galettes non garnies.

- le générateur de débit constant.

- une cuve d'alimentation B qui contient la suspension qui est constamment brassée par un agitateur mécanique. La capacité de cette cuve étant insuffisante, une partie de la suspension est mise en réserve dans des réservoirs de stockage Ai et transférée, par pompe, au fur et à mesure des besoins.

- un bac de réception C qui recueille l'eau qui a traversé la colonne - préalablement débarassée des particules qui ont été captées par une toile métallique dont la dimension des mailles est inférieure à la taille des particules - .

II.2.2. Le système de mesures pour le milieu poreux discontinu.

Il est placé sur la colonne dans les galettes qui ne contiennent pas de milieu poreux.

II.2.2.1. Mesure des pressions

Elle est réalisée de façon classique par des prises en paroi reliées aux tubes piézométriques d'un multimanomètre. Pour éviter que la suspension ne colmate pas les prises, la pression est transmise au tube piézométrique par l'intermédiaire d'une aiguille hypodermique qui pénètre dans la colonne et dont l'extrêmité biseautée est orientée de telle manière que les particules ne puissent se déposer à l'extrêmité (figure 6).

II.2.2.2. Mesure des concentrations

Nous avons choisi un procédé dérivé de celui qui a été utilisé par HERZIG , qui consiste à déterminer la concentration de la suspension par l'atténuation qu'elle produit sur un faisceau lumineux.
Le générateur de lumière a été réalisé à partir d'un projecteur de diapositives dont l'alimentation électrique a été régulée pour éliminer les erreurs induites par les fluctuations de la tension du réseau. Le contrôle du flux lumineux est assuré par un système identique à celui qui est utilisé pour la mesure des concentrations. Les indications obtenues permettent de corriger les erreurs pouvant résulter des variations de flux. La lumière est transmise jusqu'à la paroi de la

colonne par des fibres optiques souples qui, après mise en place, sont fixées pour éviter les variations de la lumière qu'engendrent les déformations de leur profil.
La lumière, après avoir traversé la suspension, est recueillie en un point diamétralement opposé à son émission par une photorésistance qui, comme son nom l'indique, est une résistance variable en fonction du flux lumineux qu'elle reçoit. Les caractéristiques de cet élément sont données sur la figure 7.
Avant la mise en place de la photorésistance dans le montage que nous allons décrire, des essais préliminaires ont permis de déterminer la plage optimale d'utilisation ainsi que la valeur de la résistance qu'il convient de lui associer. On a aussi abouti au circuit de la figure 8 qui permet de traduire l'éclairement reçu par la photorésistance en signal électrique. Il s'agit essentiellement d'un opérateur analogique connu sous le nom de soustracteur, réalisé à partir d'un amplificateur opérationnel (associé à des résistances dont l'une d'elles est la photorésistance (traduction d'éclairement en résistances). Ce montage présente un double intérêt :

- d'une part, il adapte la tension au point a (figure 8) qui varie en fonction de l'éclairement aux caractéristiques de l'organe de sortie de la chaîne de mesure (enregistreur, centrale) ;

- d'autre part, il soustrait à cette tension une tension constante ; on peut ainsi déplacer la référence à partir de laquelle s'effectuent les mesures.

La tension ainsi obtenue présente un bruit extrêmement important comme en témoigne la reproduction d'un enregistrement sur la figure 9a. Ce bruit provient, essentiellement, des fluctuations - à grande et petite échelle - de la concentration de la suspension sur le trajet du faisceau lumineux. La suspension est constituée de particules dont la taille n'est pas strictement négligeable devant les dimensions du cône lumineux issu de la fibre optique, d'où les fluctuations à petite échelle. Par ailleurs, la concentration de la suspension n'est constante

dans le temps ni dans l'espace qu'en valeur moyenne ; elle présente des fluctuations qui correspondent aux fluctuations à grande échelle. Il a donc été nécessaire de filtrer le signal qui est ainsi moyenne dans le temps. On obtient alors des enregistrements du type de celui qui est reproduit sur la figure 9b. Le bruit n'a pas entièrement disparu ; il a été cependant sensiblement atténué pour que le dépouillement des tracés puisse être exécuté sans trop de difficultés.
Le phénomène de rétention dans la colonne étant observé sur des durées plus ou moins longues, il est nécessaire d'enregistrer l'évolution en fonction du temps, de la concentration de la suspension, aux différents points de mesure ainsi que les variations du flux lumineux du générateur, soit au total : six voies . Nous avons utilisé simultanément deux types d'enregistreurs (analogique et numérique) synchronisés.

L'enregistreur analogique est un système classique multivoies dans lequel les tracés des spots d'un certain nombre de galvanomètres à cadre mobile impressionnent un rouleau de papier photographique, entraîné à vitesse constante. La lumière qui éclaire les miroirs des galvanomètres est fournie par une source à vapeur de mercure dont le spectre est dominé par un rayonnement ultraviolet. On enregistre sur la même bande les créneaux fournis par une base de temps et un signal de référence, utilisé comme nous le verrons plus tard, pour permettre la synchronisation avec la centrale.

Le dépouillement des enregistrements graphiques est un travail ingrat, fastidieux et long, qui peut être entâché d'erreurs étant donné que l'existence du bruit nécessite la prise en compte , quelque peu subjective, de la valeur moyenne de la courbe au point considéré. Pour pallier ces inconvénients, nous avons utilisé une centrale d'acquisition de données placée en parallèle avec l'enregistreur à papier photographique.

Bien que la structure d'un tel système soit bien connue, nous nous permettons de la rappeler compte tenu de l'utilisation qui en a été faite dans le problème à résoudre. L'organisation de la centrale

est indiquée sur la figure 10. On y distingue :

- un multiplexeur,
- un convertisseur,
- une imprimante,
- la logique.

1. Le multiplexeur, essentiellement un commutateur, à n positions, correspondant aux n voies de mesure dont il faut acquérir les informations e_1, e_2,...., e_n . Le commutateur reste sur une voie pendant la durée nécessaire au convertisseur pour assurer le passage de la grandeur analogique e_i à un nombre.

2. Le convertisseur analogique numérique, utilisé dans notre cas, est d'un type particulier puisqu'il donne sous forme numérique la valeur moyenne sur un intervalle de temps T de la tension qui est appliquée à l'entrée, c'est-à-dire la résultante de l'opération :

$$\frac{1}{T}\int_0^T e_i(t)\,dt \qquad (T \text{ est réglable})$$

Cet appareil est donc un calculateur spécialisé. Le choix de T est dicté , dans notre problème, par un compromis. Plus T est grand, plus faible devient l'influence du bruit, plus précise est la prise de moyenne.
Connaissant la fréquence maximale du bruit, il est possible d'estimer l'erreur commise ; inversement, on peut déterminer T en se fixant une limite de l'erreur. Par ailleurs, T ne doit pas être trop grand vis à vis du temps caractérisant l'évolution du phénomène.

3. L'imprimante sur laquelle s'inscrivent les valeurs moyennes successives des différents e_i .

4. La logique qui assure et contrôle le fonctionnement séquentiel des différents organes de la centrale.

L'utilisation des centrales de mesure ne peut se faire sans un minimum de précautions car on peut obtenir des valeurs erronées. Fonctionnant à partir de signaux du type tout ou rien, elles sont très sensibles aux parasites (impulsions) générés dans leur environnement ; ces derniers faussent les résultats issus de l'organe numérique et perturbent le déroulement normal des différentes phases des séquences. Le fonctionnement intempestif de la centrale a été effectivement observé au début de son utilisation et nous avons dû la protéger contre les parasites par des filtres appropriés disposés sur le cable d'alimentation du secteur. Ainsi, les déclenchements erratiques ont été assez rares.

Dans ces conditions,l'utilisation en parallèle de l'enregistreur à papier photographique permet de contrôler le bon fonctionnement de la centrale et de rejeter éventuellement des valeurs erronées. Une synchronisation est néanmoins nécessaire. Après quelques tentatives infructueuses, nous avons résolu le problème en envoyant sur une des voies de la centrale et sur un des galvanomètres de l'enregistreur un même signal en dents de scie, de caractéristiques connues. La synchronisation est contrôlée par la coïncidence entre les valeurs lues sur la bande d'enregistrement et la valeur numérique inscrite par l'imprimante. Cette dernière est la valeur de la tension de dent de scie à l'instant $t + \Delta T / 2$ (ΔT, temps sur lequel est prise la valeur moyenne du signal). On objectera que cette méthode ne permet une synchronisation qu'à pt' près, t' étant la période de la dent de scie, p un entier. En fait, il ne saurait y avoir d'ambiguité car l'écart éventuel ne peut valoir qu'une fraction de t'. Bien entendu, on suit les enregistrements analogique et numérique à partir de leur origine commune, le temps t correspond à un résultat issu de l'imprimante et obtenu en comptant le nombre n de valeurs imprimées $t = n T$. Sur l'enregistreur analogique, il est donné par la base de temps.

II.3. EXECUTION D'UNE EXPERIENCE

II.3.1. Essais préliminaires

II.3.1.1. Dérive du système de mesure.

Malgré toutes les précautions prises dans la réalisation des montages électroniques et bien que l'ensemble de l'installation soit à une température sensiblement constante, la chaîne de mesure peut être le siège de dérives qui introduisent des erreurs dans les mesures. Pour apprécier les corrections à effectuer, nous avons enregistré la dérive pendant un temps correspondant à la durée maximale d'une expérience.

Les résultats de cet essai sont traduits sur les figures 11-a,b,c,d, e,f, . Ils peuvent être utilisés pour corriger les valeurs obtenues dans chaque expérience. On observe que la dérive et donc la correction sont faibles vis à vis des variations de la tension provoquées par la mesure de concentrations et généralement négligeable.

II.3.1.2. Etalonnage

Pour faire l'étalonnage, on utilise la colonne complète (mais sans le milieu poreux) et la cuve B. On calcule le volume du liquide de l'ensemble et, dans la cuve B, on prépare successivement les suspensions dont les concentrations varient entre 0,2°/oo et 1,2°/oo. On met ensuite en circulation la suspension en circuit fermé entre la colonne et la cuve B. Les valeurs de chaque voie de mesure sont prises en compte par l'enregistreur analogique et la chaîne d'acquisition des données. Les résultats des étalonnages sont portés sur les figures 12-a,b,c,d,e,f, et 13-a,b,c,d,e,f.

II.3.2. Les différentes étapes de l'expérience

Une expérience comprend les étapes suivantes :

1°. Nettoyage complet de l'installation (cuves, colonne, tuyaux, piézomètres).

2°. Mise en place du milieu poreux. Une même quantité de milieu poreux déterminée par pesée est déposée dans chaque galette. L'homogénéité du milieu est réalisée en tapotant légèrement avec un maillet en bois.

3°. Remplissage en eau des cuves de stockage A_i (80 litres chacune) qui sont laissées au repos pendant 24 heures, temps au bout duquel on estime que la température est atteinte (la température de la salle climatisée : soit 20°C).

4°. Saturation en eau de la colonne. Elle s'effectue très lentement en injectant l'eau de bas en haut pour eviter le piégeage de bulles d'air.

5°. Mise sous tension de l'appareillage de mesure au moins quatre heures avant le début de l'expérience pour que l'équilibre thermique soit atteint et que la dérive reste dans les limites qui sont données par la figure 11-a,b,c,d,e,f.

6°. Préparation de la suspension : dans la cuve A_i on mélange le liquide avec les particules de rilsan à une concentration de 1°/$_{oo}$.

7°. On ferme la vanne de sortie de la cuve D et on ouvre celle de la cuve B. A cet instant, commence l'injection de la suspension dans la colonne ; on note l'heure correspondant à la fois sur l'enregistreur analogique et sur l'imprimante.

8°. Au cours de l'expérience , on change la toile métallique "m" qui récupère les particules solides à la sortie du milieu poreux. On note la durée pendant laquelle les particules se sont déposées sur la toile.

9°. Régulièrement, on relève les niveaux des piézomètres (toutes les 15 ou 30 minutes).

10°.Après avoir fini l'expérience proprement dite, on ferme la vanne de sortie de la cuve B et on arrête le fonctionnement de l'appareillage de mesures électriques.

11°.Vidange de la colonne. Pour éviter que les décolmatages éventuels d'une galette ne se répercutent sur la quantité de matière piégée dans la galette qui lui fait suite,l'extraction de l'eau contenue dans la colonne se fait progressivement du haut vers le bas en utilisant l'orifice des prises de pression pour vidanger successivement les galettes.

12°. Démontage de la colonne.

13°. Ayant comme but de faire le bilan de matière, on lave le milieu poreux et on récupère les particules de rilsan sur des toiles métalliques. Après les avoir séchées dans une étuve, on les dispose dans la salle climatisée pendant quelques heures pour qu'elles récupèrent l'humidité qu'elles avaient avant d'être utilisées. Une fois séchées, on effectue une pesée.

14°. Pour le dépouillement de l'information, on utilise un ordinateur (WANG 2000) programmé en langage BASIC.

CHAPITRE III

RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.1. METHODE D'EXPLOITATION DES DONNEES EXPERIMENTALES OBTENUES SUR LE MILIEU POREUX DISCRETISE.

III.1.1. Obtention des courbes de rétention

Nous disposons (cf. Chapitre II) :

. de l'enregistrement en continu des signaux délivrés par les dispositifs de mesure de la concentration de la suspension en un certain nombre de points de la colonne ;

. d'une suite de nombres qui sont les valeurs moyennes sur un intervalle de temps des signaux précédents ;

. des courbes d'étalonnage des dispositifs de mesure des concentrations ainsi que l'évolution dans le temps de leur dérive.

La première opération de traitement des données brutes consiste à convertir les valeurs des enregistrements en concentrations. Ceci se fait à partir des valeurs numériques fournies par la centrale de mesure en tenant compte des courbes d'étalonnage et des corrections éventuelles de dérive. Les enregistrements analogiques sont utilisés

comme éléments de contrôle du bon fonctionnement de la chaîne d'acquisition des données.

Le résultat de ce dépouillement nous permet de tracer, pour une expérience donnée, les courbes représentant la variation de la concentration de la suspension aux différents points de mesure (a,b,c,d,e) situés sur la colonne (figure 14). On obtient ainsi les familles de courbes $C_a(t)$, $C_b(t)$, $C_c(t)$, $C_d(t)$, $C_e(t)$ dont l'allure est représentée sur la figure 15.

Il s'agit de déterminer à partir de ces courbes l'évolution dans le temps de la rétention le long d'une colonne continue de même section et contenant le même volume de milieu poreux que la colonne du dispositif expérimentale.

En toute rigueur, on devrait utiliser la procédure suivante. On corrige d'abord les courbes de la figure 15 pour tenir compte du fait que la mesure de la concentration de la suspension est faite à une certaine distance des sections d'entrée et de sortie de chaque galette. La concentration à la sortie de la $n^{ième}$ galette étant égale à la concentration à l'entrée de la $n + 1^{ième}$, il est légitime d'admettre qu'entre le point de mesure et l'entrée ou la sortie des deux galettes successives la concentration demeure constante ; dans ces conditions, il faut faire subir aux courbes $C_a(t)$, $C_b(t)$, $C_c(t)$, $C_d(t)$, $C_e(t)$ des translations suivant l'axe des abscisses d'une valeur $\Delta t = V/\Delta L$, ΔL étant la distance entre le point de mesure et la section d'entrée ou de sortie des galettes correspondantes. $C_a(t)$ donne la courbe $C_{I_e}(t)$, courbe de concentration dans la section d'entrée de la galette I ; de même, $C_b(t)$ donne $C_I(t)$ et $C_{II_e}(t)$, concentrations respectives à la section de sortie de la galette I et à la section d'entrée de la galette II. On opère de même pour $C_c(t)$, $C_d(t)$ et $C_e(t)$.

Les courbes $C_{I_e}(t)$, $C_{I_s}(t)$; $C_{II_e}(t)$, $C_{II_s}(t)$; $C_{III_e}(t)$, $C_{III_s}(t)$; $C_{IV_e}(t)$, $C_{IV_s}(t)$ permettent alors de calculer $\sigma_I(t)$,

$\sigma_{II}(t)$, $\sigma_{III}(t)$, $\sigma_{IV}(t)$. Pour cela, considérons une galette comprise entre les abscisses x_1 et x_2 (figure 16). A partir de l'instant t_1 et pendant un intervalle de temps Δt un volume de matière v pénètre dans la galette , soit :

$$S\ V \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} C\ (x_1\ ,\ t)\ dt \qquad \text{(III.1)}$$

Il ressort au temps t_2 après avoir abandonné une certaine quantité de matière, $t_2 - t_1$ étant le temps de transit du volume considéré.

Le volume de matière retenu pendant l'intervalle de temps t_1 t_2 est dans ces conditions :

$$\Sigma_{(t_1\ t_2)} = SV\ [\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} C\ (x_1\ ,\ t)\ dt - \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} C\ (x_2\ ,\ t)\ dt\ ] \qquad \text{(III.2)}$$

Cette relation permet donc de calculer la rétention pendant un intervalle de temps donné et on peut, à partir des courbes (C_{I_e}, C_{I_s}); $(C_{II_e}\ ,\ C_{II_s})$; $(C_{III_e}\ ,\ C_{III_s})$; $(C_{IV_e}\ ,\ C_{IV_s})$, déterminer pour chaque galette l'évolution de la rétention en fonction du temps.

Une autre méthode plus simple mais moins rigoureuse peut être utilisée pour obtenir la rétention d'une galette à un instant donné. Soit Σ_{t_1} cette valeur :

$$\Sigma_{t_1} = \int_{x_1}^{x_2} [\sigma\ (x,\ t_1\ )\ +\ \varepsilon\ C\ (x,\ t_1\ )\ ]\ \ S\ dx \qquad \text{(III.3)}$$

$$\Sigma_{t_1} = S\,V \int_0^{t_1} [\, C(x_1\,,\,t) - C(x_2\,,\,t)\ \ dt\,] \qquad \text{(III.4)}$$

On peut admettre en première approximation que σ est constant dans la galette considérée et que εC est négligeable devant σ. On obtient alors :

$$\sigma_{t_1} = \frac{\Sigma_{t_1}}{S\ \Delta x} = \frac{V}{\Delta x} \int_0^{t_1} [\, C\,(x_1\,,\,t) - C\,(x_2\,,\,t)\,]\ dt \qquad \text{(III.5)}$$

Cette relation simplifie très sensiblement l'exploitation des courbes expérimentales mais donne des valeurs erronées de σ dans les premiers instants du phénomène où il serait alors plus rigoureux d'utiliser la procédure qui précède.

Par ailleurs, dans la restitution des résultats ramenés à une colonne continue, il convient d'effectuer une correction sur le temps; il faut en effet tenir compte du temps de transit de la suspension dans les galettes qui ne contiennent pas du milieu poreux.

Dans la pratique, l'exploitation des courbes en vue de la détermination de la rétention se simplifie. En effet, on admet que l'on peut appliquer la relation (III.5) et par ailleurs Δt est négligeable devant le temps total ; il est par conséquent inutile de faire subir aux courbes expérimentales les translations correspondantes. En effet, dans les expériences réalisées, Δt vaut 1.76 sec.

III.1.2. Passage d'une colonne discrétisée à une colonne continue.

La méthode expérimentale et l'exploitation des résultats qu'elle fournit donnent nécessairement une valeur discrète de la rétention le long de la colonne. Pour obtenir la répartition continue de la rétention on suppose que σ , à un instant donné, peut être représentée sous la forme d'un polynôme en x soit :

$$\sigma(x)_t = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \qquad \text{(III.6)}$$

En intégrant cette relation pour chaque galette, sachant par ailleurs que l'on connait la rétention et donc la quantité de matière qu'elle contient, on obtient un système de quatre équations qui permet de déterminer pour chaque valeur de t les coefficients a_0 , a_1 , a_2 , a_3 du polynôme :

$$\int_{x_{N_e}}^{x_{N_s}} \sigma(x)\,dx = \left| a_0 x + a_1 \frac{x^2}{2} + a_3 \frac{x^3}{3} + a_4 \frac{x^4}{4} \right|_{x_{N_e}}^{x_{N_s}} = \Sigma\, N_{1_t} . \Delta x$$

(III.7)

III.2. VALEUR DES PARAMETRES EXPERIMENTAUX (MILIEU POREUX CONTINU ET DISCONTINU).

Nous distinguons deux séries d'essais : la première faite avec un milieu poreux discontinu - essais 1,2,3,4 ; la deuxième est relative au milieu poreux continu - essais $V_{0.75}$, $V_{1.5}$, V_3 , $V_{4.5}$, V_6.

Ces séries présentent en commun les données suivantes :

Milieu poreux :

. diamètre de la colonne	12,7 cm
. hauteur d'une galette	15 cm
. nombre de galettes	4
. diamètre des billes de verre constituant le milieu poreux	2,45 mm
. porosité	0,36
. perméabilité calculée par la formule de KOZENY	$0,73.10^{-8}$ m/jour

Suspension :

. particules de Rilsan de couleur rouge	
. masse volumique	$1,06.10^{3}$ Kg/m^3
. diamètre des particules (d_s)	$125 < d_s < 160\mu$
. concentration lors de la préparation de la suspension	10^{-3}

Liquide :

. eau	
. viscosité(dynamique) à 20°C	1,23 cp
. température	20°C
. (1) R_e	1,79
. (1) G	16,4
. (2) ΔP (par galette)	5,7 mm

---

(1). Ordre de grandeur étant donné les légères variations de la vitesse pour les différentes expériences.

(2). Calculé à partir de la perméabilité déterminée par la formule de KOZENY.

Expériences réalisées avec le milieu poreux discontinu

Référence de l'essai	Durée	Vitesse de Darcy (V) m/s
1	10h 45mn	$6,83 . 10^{-4}$
2	9h 58mn	$7,13 . 10^{-4}$
3	13h 00mn	$7,09 . 10^{-4}$
4	9h 58mn	$7,09 . 10^{-4}$

Expériences réalisées avec le milieu poreux continu

Référence de l'essai	Durée	Vitesse de Darcy (V) m/s
$V_{0.75}$	0h 45mn	$6,96 . 10^{-4}$
$V_{1.5}$	1h 30mn	$7,09 . 10^{-4}$
V_{3}	3h 00mn	$7,03 . 10^{-4}$
$V_{4.5}$	4h 30mn	$7,09 . 10^{-4}$
V_{6}	6h 00mn	$6,96 . 10^{-4}$

III.3. RESULTATS POUR LE MILIEU POREUX DISCONTINU

III.3.1. Courbes de concentration

Les courbes de la variation de la concentration en fonction du temps sont données sur les figures suivantes : essai 1 (fig.17) , essai (fig. 18) , essai 3 (fig.19), essai 4 (fig.20).

Les temps nécessaires pour que la concentration prenne sensiblement une valeur constante à l'entrée de la colonne sont les suivants :

essai N°	temps
1	0h 40mn
2	1h 00mn
3	1h 30mn
4	0h 45mn

La réalisation de l'échelon n'est pas parfaite. On peut néanmoins estimer qu'elle est satisfaisante eu égard à la durée de l'essai. On peut expliquer l'existence d'un temps de réponse non nul par le fait qu'une certaine quantité de suspension se dépose dans tout le domaine situé entre la cuve d'alimentation et le point de mesure de la concentration. Lorsque les sites de rétention qui y sont présents (parois du tube, singularités diverses) sont saturés, la concentration au point de mesure s'établit à une valeur sensiblement constante. On note une dispersion assez importante des temps d'établissement.

La suspension a toujours été préparée dans les mêmes conditions et de telle façon que sa concentration soit égale à 10^{-3}. Or, la valeur

du palier de concentration à l'entrée de la colonne n'est pas la même d'un essai à un autre (essai n° 1 : $1,05.10^{-3}$ - n°2 : $1,15.10^{-3}$ - n°3 : $1,05.10^{-3}$ - n°4 : 10^{-3}). Nous ne pouvons pas préciser l'origine des écarts ; ces derniers peuvent résulter soit d'une mauvaise homogénéisation de la poudre dans l'eau, soit du système de mesure par suite de dépôts sur les parois. C'est cette deuxième hypothèse qui nous paraît la plus vraisemblable malgré la présence du sel dans l'eau qui réduit sensiblement, si non élimine, ce phénomène parasite. En effet, s'il s'agit d'un défaut d'homogénéisation de la suspension, on pourrait observer soit des valeurs supérieures , soit des valeurs inférieures à 10^{-3}. Par contre, tout dépôt se traduit par un accroissement de l'indication de la valeur donnée par le système de mesure et il présente un caractère non répétitif d'une expérience à une autre. Tout dépôt est particulièrement sensible sur le système de mesure des concentrations étant donné que le domaine d'émission et de réception de lumière a une dimension qui, en définitive, n'est pas très grande vis à vis de la taille des particules.

Les courbes de variation de la concentration aux entrées et sorties des galettes présentent des discontinuités de pente assez nombreuses. Pour expliquer leur origine, on serait tenté de mettre en cause le système de traitement des signaux issus des chaînes de mesure de la concentration si on se bornait à comparer la courbe $C_a(t)$ de la figure 17 (essai n°1) aux courbes $C_a(t)$ des figures 18,19 et 20 (essais n° 2,3,4). La première a été obtenue par un dépouillement strictement manuel de l'enregistrement analogique ; les autres sont fournies par la centrale de mesure qui, nous le rappelons, assure un pré-traitement des signaux en intégrant ceux-ci sur une durée de 54 secondes. Ce système ne nous paraît pas devoir être mis en cause ; il a été précisément mis en place pour éviter toute interprétation subjective des enregistrements. Nous pensons que c'est peut-être cette subjectivité qui a joué dans ce cas ; le nombre de points à partir duquel cette courbe particulière a été tracée est de plus beaucoup plus faible que

dans le cas du traitement automatique . Nous avons donc implicitement lissé la courbe.

La comparaison des autres courbes montre que les "irrégularités" se manifestent dans tous les essais. Elles traduisent, sans doute, les remises en suspension occasionnelles. Il semble donc que, dans les conditions expérimentales où nous avons opéré , il y ait une superposition permanente de remise en suspension et de dépôt des particules, le dernier phénomène l'emportant sur le premier. Il ne s'agit peut-être pas de la seule interprétation possible des "discontinuités". Nous aurons l'occasion, ultérieurement, d'avancer une autre hypothèse.

L'examen montre également des écarts très importants entre les valeurs des concentrations à l'entrée et à la sortie d'une galette à un instant donné pour des essais différents 1,2,3,4. Il n'y a donc pas répétabilité des expériences bien que les conditions de leur réalisation aient été très sensiblement identiques.

III.3.2. Bilans de masse

Il est intéressant de comparer la rétention d'une galette mesurée en fin d'expérience par pesée de la matière à la rétention qui peut être déduite de l'enregistrement des concentrations à l'entrée et à la sortie des galettes considérées.

Les résultats sont donnés dans les tableaux qui suivent. L'écart entre les résultats des méthodes de mesure est défini par la différence entre la valeur de la rétention obtenue par pesée et la rétention déduite des courbes de concentration ; cette différence est divisée par la quantité de matière pesée.

Ces tableaux sont traduits sous forme de graphiques (figures 21, 22, 23 et 24).

TABLEAU N° 1 - EXPERIENCE N°1

N° de galette	Rétention calculée par la méthode photoélectrique g	Rétention mesurée par pesée g	Ecarts relatifs par rapport à la pesée (%)
1	38.63	31.3	23
2	55.80	54.7	2
3	40.21	46.8	- 14
4	86.75	71.7	21
Sortie	159.27	133.8	19
Total	380.66	338.3	12.5

TABLEAU N° 2 - EXPERIENCE N° 2

N° de galette	Rétention calculée par la méthode photoélectrique g	Rétention mesurée par pesée g	Ecarts relatifs par rapport à la pesée (%)
1	72.05	68.4	5.3
2	63.20	59.5	6.2
3	47.21	42.6	10.8
4	45.50	40.2	13.2
Sortie	160.08	140.6	13.8
Total	388.01	351.3	10.4

TABLEAU N° 3 - EXPERIENCE N° 3

N° de galette	Rétention calculée par la méthode photoélectrique g	Rétention mesurée par pesée g	Ecarts relatifs par rapport à la pesée (%)
1	99.86	97.5	2.4
2	107.69	101.6	6
3	98.15	87.9	11.7
4	75.14	72.3	3.9
Sortie	85.42	80.9	5.6
Total	466.26	440.2	5.9

TABLEAU N° 4 - EXPERIENCE N° 4

N°de galette	Rétention calculée par la méthode photoélectrique g	Rétention mesurée par pesée g	Ecarts relatifs par rapport à la pesée (%)
1	103.04	99.4	3.7
2	55.07	54.1	1.8
3	36.47	33.5	8.9
4	27.68	23.8	16.3
Sortie	116.26	111.9	3.9
Total	338.51	322.7	4.9

La concordance entre les résultats des deux types de mesure n'est pas très bonne. Les écarts peuvent s'expliquer par les dépôts de particules sur les parois de la conduite au voisinage des points d'émission et de réception de la lumière comme indiqué précédemment. Les dépôts ne sont évidemment pas identiques en tous les points de mesure si bien que la détermination de la rétention qui est obtenue par différence n'élimine pas l'erreur due aux dépôts.

Les écarts que nous observons peuvent être également influencés par la non-uniformité de la concentration de la suspension sur l'ensemble de la section de mesure et, en particulier, sur le trajet du faisceau lumineux, l'uniformité de la concentration étant l'hypothèse de base du principe de msure et de l'étalonnage du système.

La non-uniformité peut exister du fait de la perturbation des conditions de déplacement de la suspension dans le milieu poreux par le gâteau qui se forme en tête de la galette et dont nous traitons dans ce chapitre.

III.3.3. Courbes de rétention $\sigma_t(x)$

Les courbes de rétention de la colonne à divers instants sont obtenues à partir des courbes de concentration après un traitement des données qui a été exposé en tête de ce chapitre. Les résultats $\sigma_t(x)$ sont donnés sur les figures : essai 2 (figure 25) - essai 3 (figure 26)- essai 4 (figure 27) ; log de $\sigma_t(x)$ sur les figures : essai 2 (figure 28) - essai 3 (figure 29) - essai 4 (figure 30).

Les anomalies observées sur les courbes de concentration et sur les bilans de masse vont correspondre à des anomalies des courbes de rétention.

La "rugosité" des courbes de concentration, c'est-à-dire le bruit qui semble les affecter,ne peut avoir d'influence sensible dans la détermination des courbes de rétention. On sait, en effet, que l'intégration a pour effet de réduire fortement l'effet du bruit.

Compte tenu des différences observées dans ces courbes de concentration,il est normal que les courbes de rétention soient différentes, les écarts sont très importants.

Indépendamment de cela, les courbes des essais 2 et 3 sont loin d'avoir une variation d'allure exponentielle comme on aurait pu l'espérer conformément aux résultats mis en évidence antérieurement par divers auteurs. Dans ces essais, on observe paradoxalement que la rétention, après un certain temps, est une fonction de x qui présente un maximum.

L'expérience N° 4 est de loin, qualitativement, la plus satisfaisante. Ce meilleur accord a été obtenu par le soin que nous avons apporté dans ce cas à assurer une section d'entrée des galettes aussi plate que possible ce qui n'avait pas été le cas dans les essais précédents pour lesquels la planéité de la section d'entrée avait été faite au jugé. Mais ces précautions n'ont pas empêché la formation du gâteau.

III.3.4. Courbes de rétention $\sigma_x(t)$

Elles sont tracées sur les figures suivantes : essai 2 (figure 31) - essai 3 (figure 32) - essai 4 (figure 33).

Après ce qui a été dit précédemment, elles ne suscitent aucun commentaire particulier ; elles montrent tout de même que nos essais n'ont pas eu une durée suffisante pour que le colmatage soit atteint.

III.3.5. La formation du gâteau à l'entrée des galettes et ses conséquences.

A l'entrée de chaque galette, nous avons constaté la formation d'un dépôt de particules classiquement appelé gâteau. Les photographies de la figure 34 montrent le dépôt observé pour les différentes galettes. Le gâteau n'a pas une épaisseur constante. Ceci est dû au fait que la première couche de billes n'est pas strictement plane ; elle présente des "aspérités" qui diffèrent d'une expérience à une autre, d'une galette à une autre. Ce dépôt évolue évidemment au cours de l'expérience ; l'aspect que nous en donnons est celui de fin d'essai au moment du démontage de la colonne. Certaines zones d'une section paraissent complètement colmatées et on peut remarquer des trous se formant dans le gâteau. C'est au travers de ceux-ci que peut donc se faire l'alimentation en suspension de la galette.

Les observations qui précèdent nous paraissent d'une très grande importance. Elles expliquent :

. que les expériences ne soient pas répétitives ; l'état de surface de la section d'entrée d'une galette qui a un caractère aléatoire ne peut avoir une répétabilité suffisante ;

. que l'on obtient des résultats qu'à l'intérieur d'un même essai, résultats qui ne paraissent pas toujours qualitativement satisfaisants. Dans une colonne continue, on observe la formation du gâteau en tête de celle-ci ; il perturbe le mécanisme de dépôt dans le milieu poreux dans la zone d'entrée puis son effet devient négligeable dans le reste du domaine. Dans la colonne discrétisée, le gâteau perturbe chaque galette.

En définitive, le phénomène parasite de formation de gâteau condamne le principe de la méthode basée sur la discrétisation du milieu poreux ; cette dernière introduit dans l'écoulement une discontinuité hydrodynamique entre la section de sortie et la section d'entrée de la galette qui le suit immédiatement ce qui n'existe évidemment pas dans le cas du milieu réel. Il est néanmoins possible que dans des conditions

expérimentales où ne se manifeste pas la formation de gâteau la méthode puisse être utlisée, si la discontinuité hydrodynamique inter-galettes a une influence négligeable. Seule l'expérience pourra confirmer ou infirmer cette possibilité.

Les observations rapportées plus haut montrent que le gâteau perturbe, sur une certaine distance de la section d'entrée que nous appellerons par commodité de langage "longueur d'entrée d'un lit filtrant", le dépôt des suspensions. L'écoulement dans cette zone doit se faire principalement sous forme de canaux. Progressivement, la dispersion du milieu poreux doit uniformiser les caractéristiques de l'écoulement dans le milieu poreux.

C'est, à notre connaissance, la première fois que cette observation est faite de façon explicite ; en fait, elle est explicitement incluse dans les résultats de IVES [8] qui, dans ses expériences mettant en oeuvre une batterie de colonnes de longueurs différentes mais alimentées dans les mêmes conditions, a dû renoncer à prendre en compte les résultats fournis par les deux premières colonnes, les plus courtes. Il n'arrive pas à interpréter convenablement les aberrations observées : nous en donnons les raisons.

Toutes les théories et expériences qui ont porté sur les dépôts de suspensions en milieu poreux ont considéré que, dans toute son étendue, le comportement du milieu poreux était le même. Or, nos expériences montrent que ceci ne correspond pas à une réalité rigoureuse. Certes, si le milieu poreux a une épaisseur "importante" vis à vis de la longueur d'entrée les effets de cette dernière pourrait être négligés et les théories développées jusqu'ici pourraient être appliquées. Si, au contraire, l'épaisseur du milieu poreux est relativement "faible" ce qui peut être un cas fréquent dans les lits filtrants vis à vis de la longueur d'entrée, celle-ci peut jouer un rôle important et il conviendra donc de corriger en conséquence les théories existantes.

III.4. RESULTATS POUR LE MILIEU POREUX CONTINU

Nous obtenons les courbes de rétention à partir de la mesure de la masse de la suspension extraite de chaque galette et pesée. Le passage de cette valeur à la répartition de la rétention le long de la colonne est obtenu par le procédé exposé en III.1.2.

Les résultats $\sigma_t(x)$ sont portés sur la figure 35. Les courbes $\log \sigma_t(x)$ sont tracées sur la figure 36. Nous considérons plus particulièrement ces dernières : on note qu'près 4h 30, l'ensemble des points expérimentaux se placent bien sur des droites et donc, après un certain temps, la variation exponentielle de la rétention le long de la colonne est bien vérifiée. Dans les premières heures du phénomène, il ne semble pas qu'il en soit ainsi. Nous ne sommes pas en mesure de justifier ces écarts sans procéder à des essais complémentaires qu'il ne nous a pas été possible d'effectuer faute de temps. On peut dire néanmoins qu'eu égard aux précisions de mesure, les points situés au-delà de 30 centimètres pour $t < 1{,}5h$ nous paraissent erronés.

Il est intéressant de comparer les résultats de cet essai avec ceux de l'essai N°4 (colonne discontinue) ; les courbes $\sigma_t(x)$ et $\log \sigma_t(x)$ et $\sigma_x(t)$ sont portées respectivement sur les figures 37, 38 et 39.

En fait, d'après ce qui a été dit plus haut, la comparaison ne peut porter que sur la rétention dans la première galette puisqu'au delà il existe des discontinuités hydrodynamiques dans l'une des deux colonnes. C'est pour cela que nous n'avons tracé les courbes $\sigma_x(t)$ que pour $x \leqslant 15$ cm soit x = 0, x = 5 cm, x = 10 cm, x = 15 cm.

On doit normalement s'attendre à ce que les rétentions dans la section d'entrée des galettes soient différentes étant donné la formation du gâteau, lui-même influencé par l'état de surface - c'est ce qui est observé - la rétention est plus élevée dans le cas du milieu poreux discontinu. Au bout d'un certain temps, on devrait voir la rétention dans les deux galettes tendre vers la même valeur au moins à des distances éloignées de la section d'entrée. On observe une évolution de la rétention dans ce sens mais les écarts sont encore sensibles ; il aurait fallu faire des expériences de plus longue durée.

III.5. CONCLUSION

Il convient de retenir plus particulièrement, dans ce chapitre, la mise en évidence de la perturbation très sensible du dépôt des suspensions circulant dans un milieu poreux par le gâteau qui se forme à l'entrée. De ce fait, les études qui ont été menées jusqu'à présent en négligeant ce phénomène doivent être revues et corrigées pour tenir compte de cette perturbation dont une analyse fine doit être entreprise.

CHAPITRE IV

APPROCHE GLOBALE DU DEPLACEMENT D'UNE SUSPENSION DANS UN MILIEU POREUX

IV.1. MOTIVATION DE LA DEMARCHE

Nous avons vu que les auteurs qui ont traité du sujet ont eu des approches du problème qui sont très voisines. Ils formulent un certain nombre d'hypothèses qui permettent d'élaborer une théorie dont la validité est confirmée par des expériences.

Les différences entre les études proviennent des hypothèses.

Ces méthodes donnent en général des résultats satisfaisants mais les vérifications étant globales, il n'est guère possible de contrôler la validité des différentes hypothèses. Dans ces conditions, il est tout aussi rationnel d'aborder l'étude du déplacement d'une suspension dans un milieu poreux sans faire la moindre hypothèse de la physique des phénomènes.

On considère pour cela le milieu poreux comme une "boîte noire" et on cherche à déterminer les caractéristiques du transfert qu'il réalise en calculant soit le noyau de convolution, soit la fonction de transfert.[1] Ceux-ci sont fonction de divers paramètres qui peuvent être regroupées sous forme de nombres grâce à l'analyse dimensionnelle. L'expérience permet de déterminer la valeur des paramètres en fonction des divers nombres.

Nous rendons compte, dans ce chapitre, de la tentative que nous avons faite pour explorer cette voie. Nous y avons été conduits pour deux raisons principales :

- la première est son originalité par rapport aux travaux antérieurs ;

- la deuxième résulte du fait que les études précédentes ne tiennent pas compte de la perturbation entraînée par la formation de gâteau et nous avons pensé que l'approche que nous proposons pouvait être une méthode pour prendre en compte ce phénomène.

IV.2. DETERMINATION DU NOYAU DE CONVOLUTION

Si le système est linéaire , on peut écrire :

$$s(t) = \int_0^T h(\tau) \cdot e(t-\tau)\, d\tau \qquad \text{(IV.1)}$$

s(t) est la concentration à la sortie d'une galette (réponse) dont l'entrée reçoit une suspension de concentration e(t).

T est la durée de mémoire du système.

$h(\tau)$ est le noyau de convolution , il caractérise le système.

---

(1). On rappelle que la fonction de transfert est la transformée de Laplace du noyau de convolution.

Dans le cas présent, nous connaissons par la mesure , d'une part e(t), d'autre part s(t) qui sont déterminés par l'expérience. Il s'agit de déterminer h(τ). Pour cela, nous avons choisi un noyau de convolution de la forme :

$$\alpha\,(e^{-at} - e^{-bt}) \qquad \text{(IV.2)}$$

α, a et b sont trois coefficients qui sont déterminés à partir des courbes expérimentales. On utilise une méthode de minimalisation aux moindres carrés, appliquée à la relation IV.1. Les calculs sont exécutés sur ordinateur.

IV.3. RESULTATS

Nous avons travaillé uniquement sur la série des résultats expérimentaux de l'essai N°4.

Pour la galette n°1, nous obtenons la relation :

$$0{,}74\,(e^{-1{,}44t} - e^{-1{,}83t}) \qquad \text{(IV.3)}$$

Pour la galette n°2 :

$$1{,}24\,(e^{-1{,}76t} - e^{-0{,}34t}) \qquad \text{(IV.4)}$$

le temps t est exprimé en minutes.

Les courbes représentant IV.3 et IV.4. sont représentées sur la figure 40. Ce sont les réponses à une impulsion de Dirac de deux galettes considérées.

Sur la figure N°41, nous avons porté la variation de la concentration à l'entrée et à la sortie des galettes. Il s'agit, d'une part des valeurs expérimentales, d'autre part des valeurs calculées d'après les relations IV.3 et IV.4.

Les relations IV.3 et IV.4 sont sensiblement différentes alors qu'on aurait pu penser qu'elles devraient être identiques étant donné que les galettes ont même structure.

Par ailleurs, la courbe de la réponse impulsionnelle part de l'origine des temps ; ceci est manifestement en contradiction avec la réalité physique puisque la suspension met un certain temps pour parvenir à la sortie.

Nous observons également un écart très sensible entre les courbes expérimentales et les courbès calculées par convolution.

Le noyau de convolution que nous avons choisi dans cette première tentative n'est donc pas bien adapté au phénomène étudié. D'autres expressions doivent être essayées ; nous n'avons pu le faire faute de temps.

IV.4. CONCLUSION

Il est difficile de conclure à partir d'une seule tentative sur l'intérêt et les possibilités pratiques de l'approche proposée. Nous pensons qu'il convient de poursuivre dans cette voie en appuyant le choix du noyau de convolution sur des considérations physiques faisant intervenir à priori l'existence d'un gâteau et de la zone d'entrée du milieu poreux qui est perturbée par ce dépôt parasite. Faute de temps, il ne nous a pas été possible de vérifier le bien fondé d'un certain nombre d'expressions que nous avons imaginées.

CONCLUSION

L'expérimentation sur milieu poreux est très difficile en elle-même. Elle devient redoutable dès que l'on cherche à analyser les phénomènes à l'échelle locale. Nos travaux sont une illustration supplémentaire de cette remarque.

Les difficultés que nous avons dû surmonter ont été nombreuses et importantes. Certes, la recherche est le fruit d'une longue patience mais elle est aussi un édifice que l'on construit pierre à pierre. Nous pensons y avoir apporté la nôtre.

Il convient de retenir de nos travaux que la méthode d'étude du dépôt par discrétisation du milieu poreux ne peut être exploitée, par suite de discontinuités hydrodynamiques que cette disposition artificielle du milieu poreux introduit. Par contre, la méthode de découpage de la colonne par tranches successives donne de bons résultats. Elle présente l'inconvénient d'une mise en oeuvre longue et laborieuse.

La méthode qui consiste à considérer le milieu poreux comme une boîte noire et à déterminer la réponse par convolution est particulièrement séduisante par son principe. Le temps que nous avons pu consacrer à son étude n'a pas été suffisant pour que nous puissions conclure. Il conviendra de persévérer dans cette direction.

Enfin, nous avons mis en évidence un phénomène très important qui remet partiellement en cause les résultats et théories antérieurs et explique certaines anomalies observées par certains auteurs. Il s'agit de la perturbation apportée par le gâteau formé à l'entrée du milieu poreux au domaine qui lui fait suite. En d'autres termes, les hypothèses habituelles qui ont été faites dans l'élaboration des théories de filtration des suspensions ne sont pas valables dans l'ensemble du milieu poreux. Elles doivent être revues pour tenir compte de l'influence du gâteau. Ceci fera l'objet d'études ultérieures.

BIBLIOGRAPHIE

[1] BORELI M., JOVASODIC D.

"Clogging of the porous media"
I.A.R.H. 9th Convention - Dubrovnik - 1961

[2] CHAUVETEAU G.

"Essai sur la loi de Darcy et les écoulements laminaires à perte de charge non linéaire".
Thèse de Docteur-Ingénieur - Toulouse - 1965

[3] FORTIER A.

"Mécanique des Suspensions"
Masson éditeur - Paris - 1966

[4] GANOULIS J.

"Remplacment d'un fluide par un autre dans des domaines de géométrie aléatoire ou non cylindrique".
Thèse de Doctorat d'Etat - Toulouse - 1974

[5] HAPPEL and BRENNER

"Low Reynolds number hydrodynamics"
Printice Hall Edit. - 1965

[6] HERZIG J.P.

"Etude de l'écoulement de suspensions à travers les milieux poreux".
Thèse de Doctorat ès Sciences Physiques - Nancy - 1970

[7] HERZIG J.P., LECLERC D.M., LE GOFF P.

"Flow of suspensions through porous media"
I.E.C., vol.62, n°5, pp.8-35 - may 1970

[8] ISON C.R., IVES K.J.

"Removal mecanisms in deep bed filtration"
C.E.S, vol.24, pp.717-729 - 1969

[9] JEFFREY R.C., PEARSON J.R.A.

"Particle motion in laminar vertical tube flow"
J. Fluid Mech., vol.22, part 4, pp.721-735 - 1965

[10] LABRID, MARTIN, MOULU

"Endommagement des formations aux abords des puits de production".
I.F.P. - Référence : 19872 - décembre 1971

[11] LAQUERBE M., LE GUENNEC B., ALQUIER M., GRUAT J.

"Détermination des forces s'exerçant sur une particule sphérique placée dans un écoulement à gradient de vitesses".
XIIèmes Journées de l'Hydraulique - Paris - 1972

[12] LE GOFF P.

"Le désaérage des liquides dans les milieux filtrants"
1er Congrès Mondial sur la Filtration - Paris - mai 1974

[13] MAROUDAS A., EISENKLAM P.

"Clarification of suspensions : a study of particle deposition in granular media- Part I - Some observations on particle deposition".
C.E.S., vol.20, pp.867-873 - 1965

[14] MAROUDAS A., EISENKLAM P.

"Clarification of suspensions : a study of particle deposition in granular media - Part II - A theory of clarification".
C.E.S., vol.20, pp.875-888 - 1965

[15] SAFFMAN P.G.

"The lift on a small sphere in a glow shear flow".
J.Fluid Mech., vol.22, part 2, pp.385-400 - 1965

[16] SAKTHIVADIVEL R.

"Theory and mechanism of filtration of non-colloïdal fines through a porous medium".
Rapport HEL 15-5 - Hydraulic Eng. - Lab. Univ. of California - Berkeley - december 1966

[17] SAKTHIVADIVEL R.

"Clogging of a granular porous medium by sediment".
Final Repport HEL 15-7 - Hydraulic Eng. - Lab. Univ. of California - Berkeley - march 1969

[18] SAKTHIVADIVEL R., EINSTEIN H.A.

"Clogging of porous column of spheres by sediment".
A.S.C.E. J. of Hydraulics Division, vol.96, n° HY2
February 1970

[19] SEGRE G., SILBERBERG A.

"Behaviour of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow".
J. of Fluid Mech., vol.14, pp.115-157 - 1962

[20] SNIEGOCKI

"Clogging in recharge wells, causes and cuves".
Proc. of Artif. Recharge Conference - University of Reading - pp.337-357 - september 1970

[21] THIRRIOT C.

"Dispersion, dépôt et dynamique des fluides".
Congrès A.I.R.H.- Istanbul - septembre 1973

[22] TZOVARIDIS S.

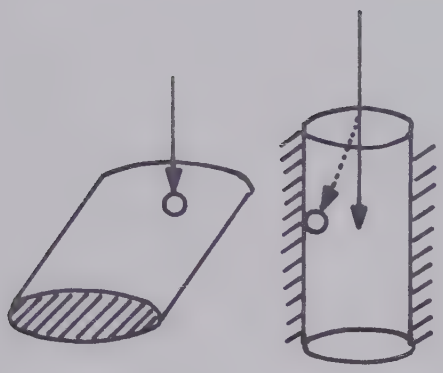
"Contribution à l'étude du déplacement d'une suspension en milieu poreux".
Thèse de Docteur-Ingénieur - Université Paul Sabatier Toulouse - 1975

[23] ZAHAF H.

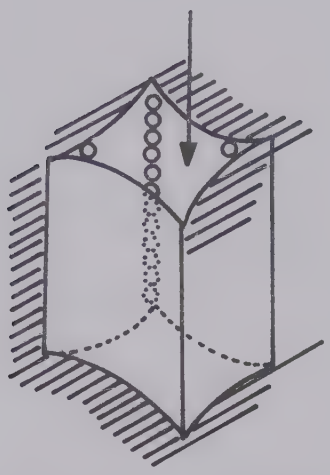
"Etude de l'influence de la forme des particules sur les conditions de leur mise en mouvement"
Thèse de Docteur-Ingénieur - Toulouse - 1975

ANNEXE-FIGURES

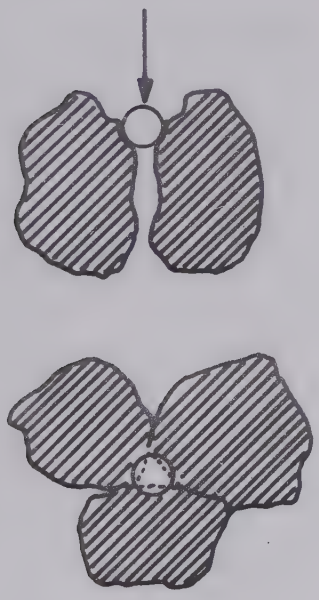
LES SITES DE RETENTION (d'après HERZIG)



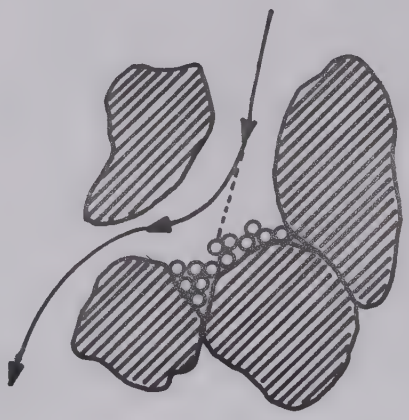
SITES DE SURFACE



SITES DE CREVASSE



SITES DE RETREINT



SITES DE CAVERNE

FIGURE: 1

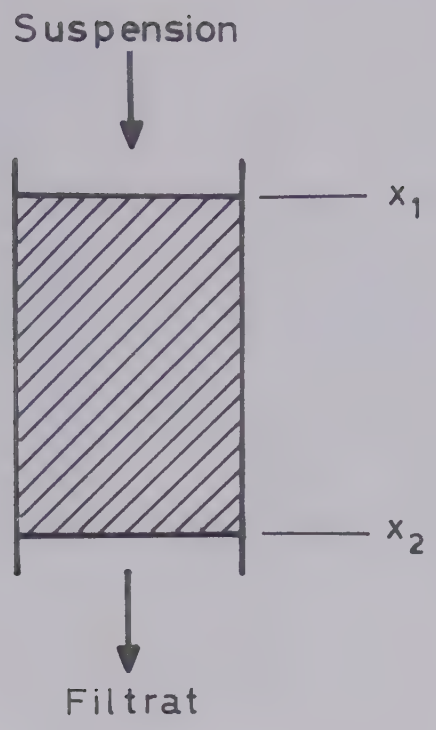


Fig. 2a : LIT FILTRANT PARTIELLEMENT COLMATE

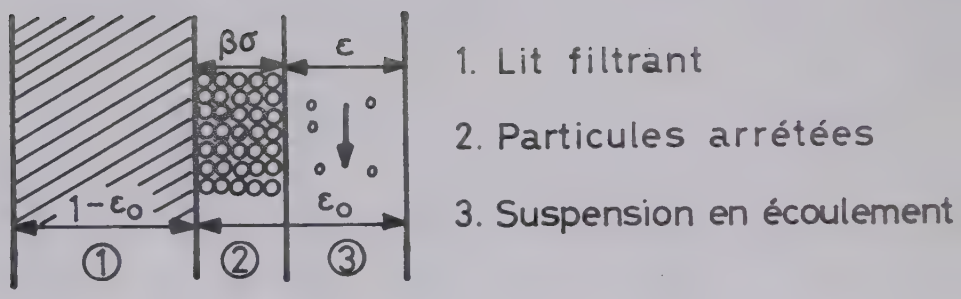


Fig. 2b : ELEMENT DE LIT FILTRANT PARTIELLEMENT COLMATE

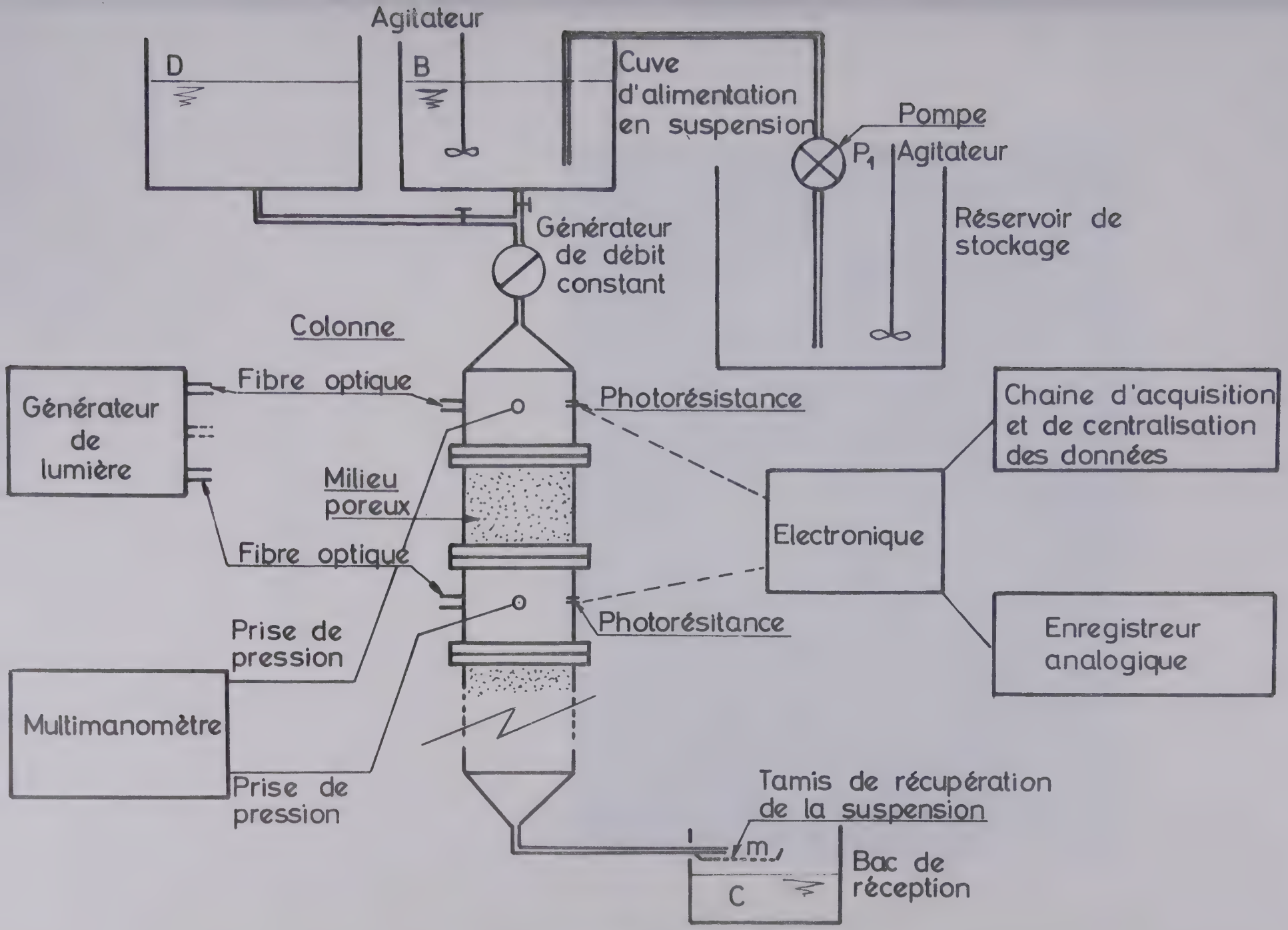
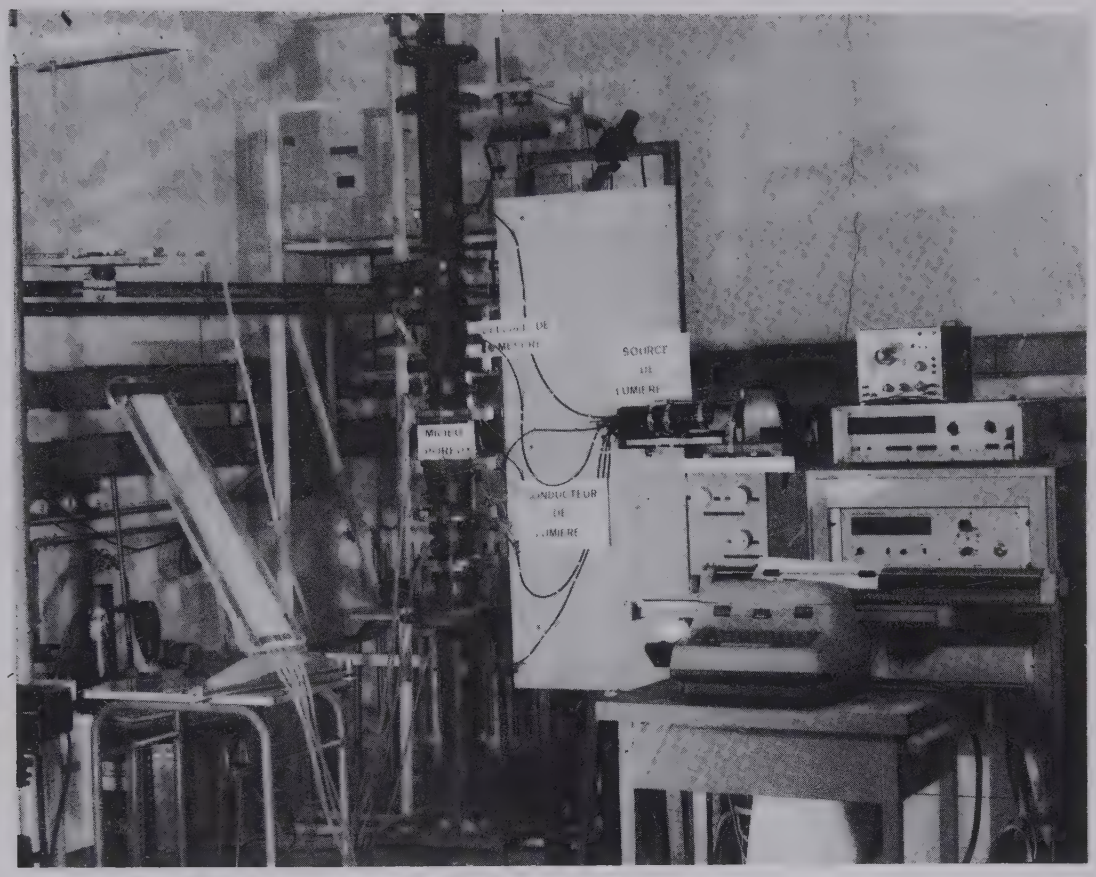


FIG. 3 : SCHEMA DE L'INSTALLATION



Installation expérimentale

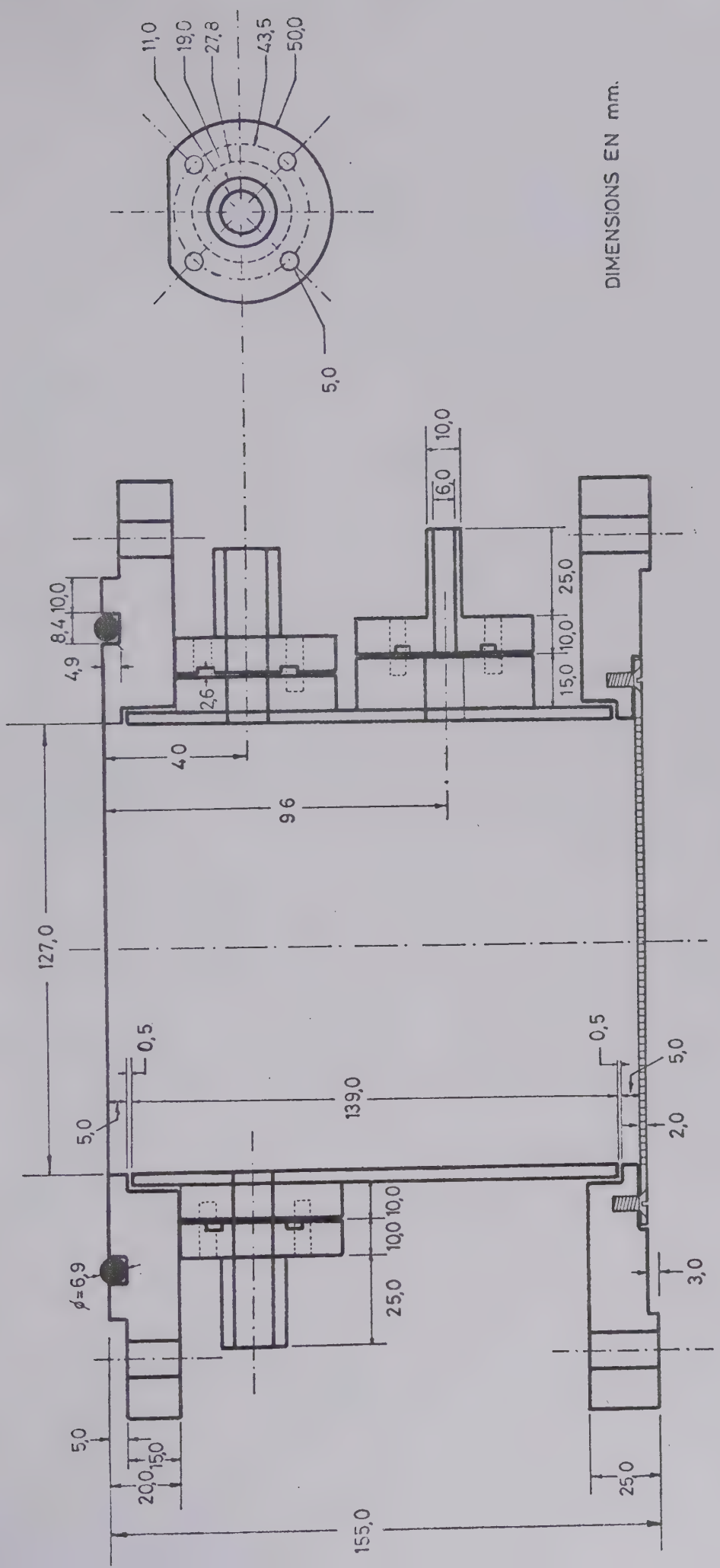


FIG.5: DESSIN D'UN MODULE DE LA COLONNE

SCHEMA D'UNE PRISE DE PRESSION

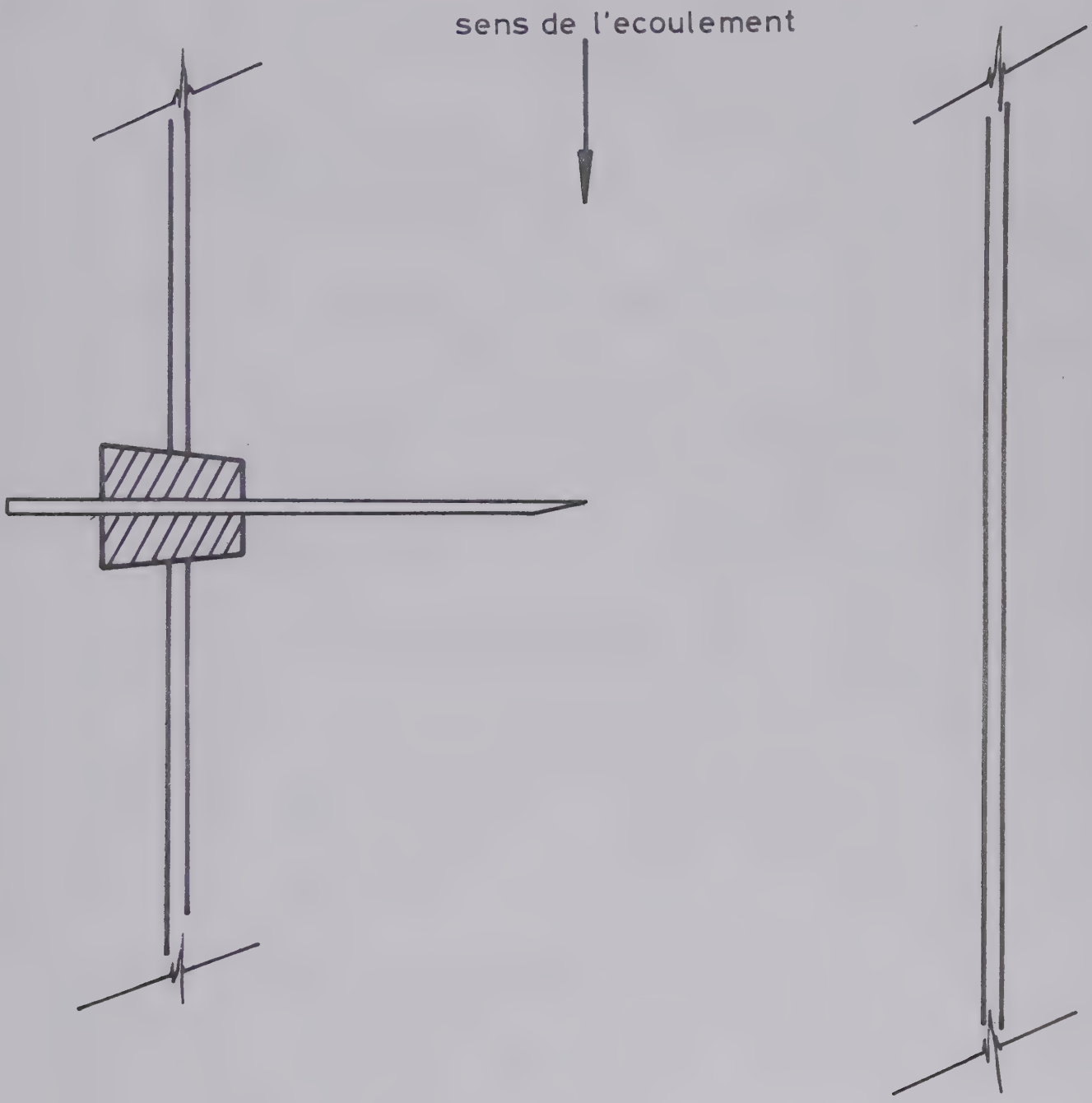


FIGURE : 6

CELLULE PHOTOCONDUCTIVE AU SULFURE DE CADMIUM

ORP 60

CARACTÉRISTIQUES

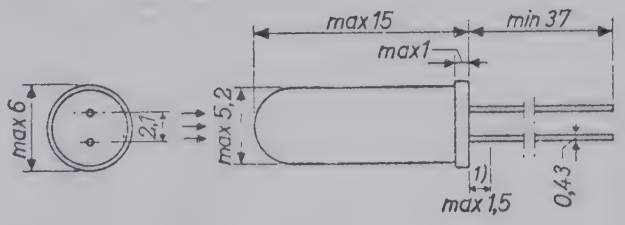
		min	typ.	max	
Surface sensible projetée.....	S =		0,25		mm²
Courant à 30 V, éclairement 53,8 lux, température de couleur 2700° K (après un stockage de 16 h dans l'obscurité)...		0,2	0,5	0,8	mA
(après 20 s dans l'obscurité complète)..				1,5	µA

VALEURS A NE PAS DÉPASSER

(Limites absolues)

Tension d'alimentation (continue et crête)	V max = 350 V
Tension d'alimentation (alternative)	V max = 250 V
Courant de la cellule	I max = 7,5 mA
Puissance dissipée	P max = 70 mW
à la température ambiante de 25 °C	P max = 70 mW
à la température ambiante de 70 °C	P max = 20 mW
Température ambiante	T = −40 à + 70 °C

DISPOSITION DES ÉLECTRODES ET ENCOMBREMENT

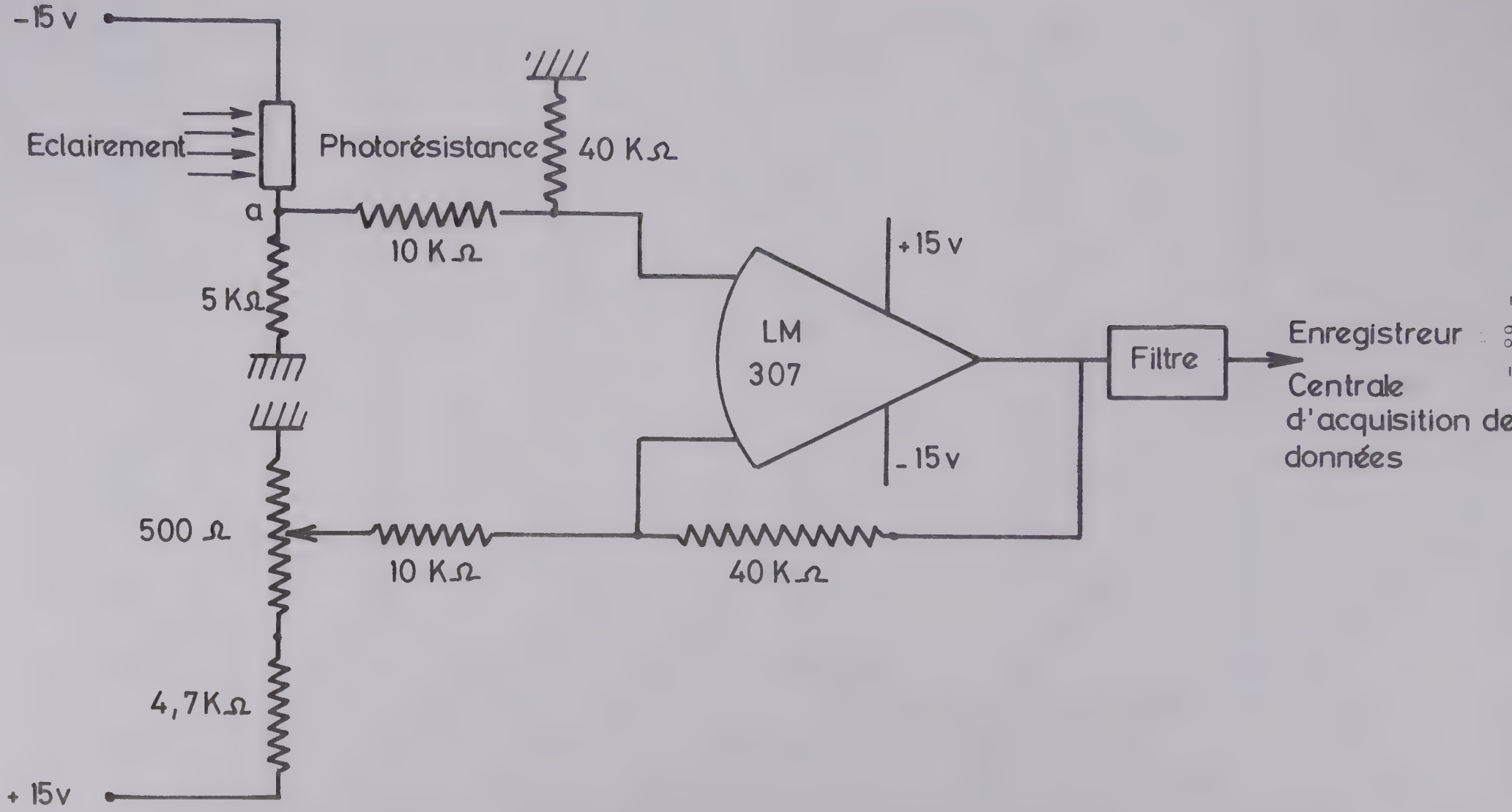


Eclairement en bout

(1) Cette portion des fils de connexion n'est pas étamée.

FIG. 7

FIG. 8: CIRCUIT ELECTRIQUE : ECLAIREMENT-SIGNAL ELECTRIQUE



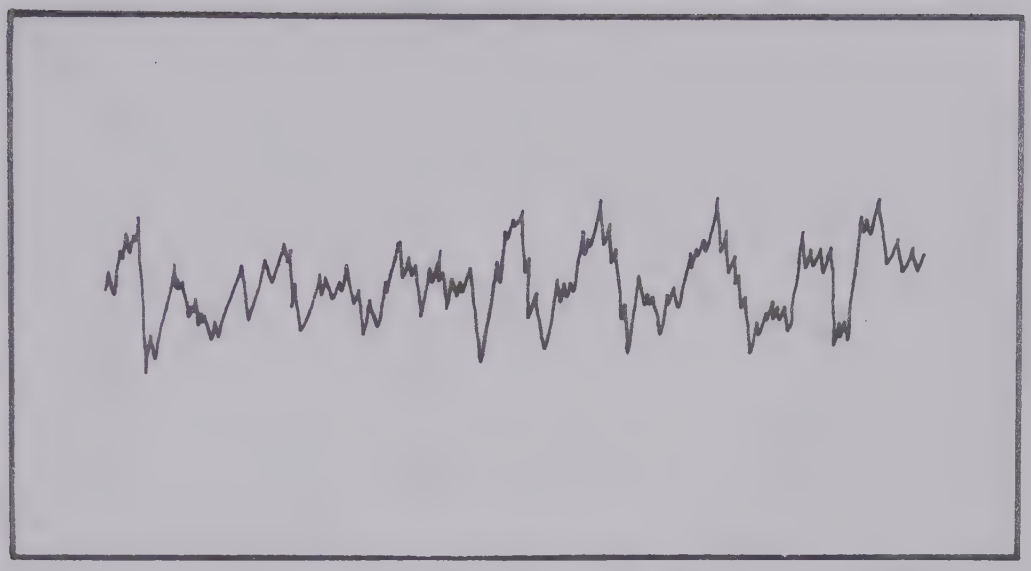


FIG. 9-a ENREGISTREMENT AVANT FILTRAGE

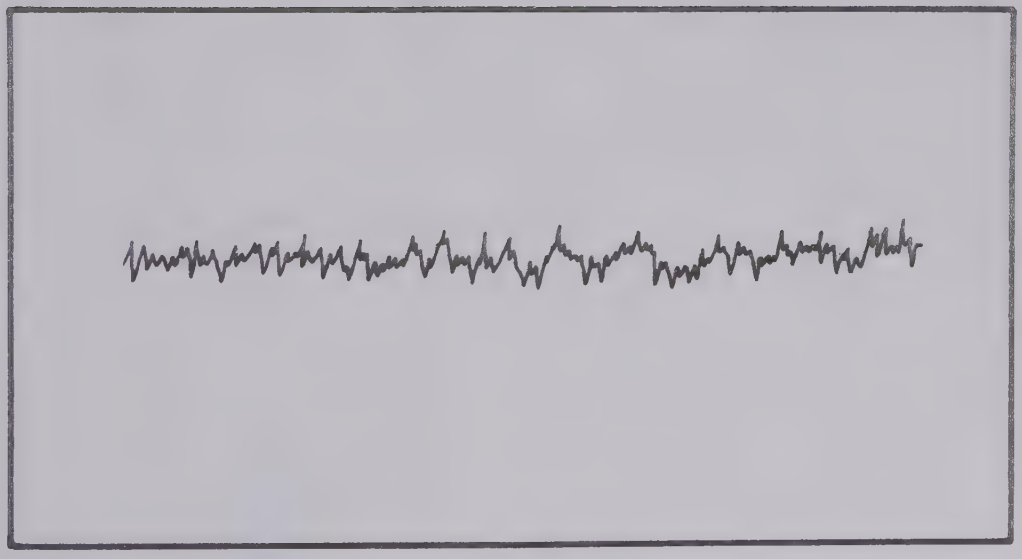


FIG. 9-b EREGISTREMENT APRES FILTRAGE

FIG.10 : ORGANISATION DE LA CENTRALE

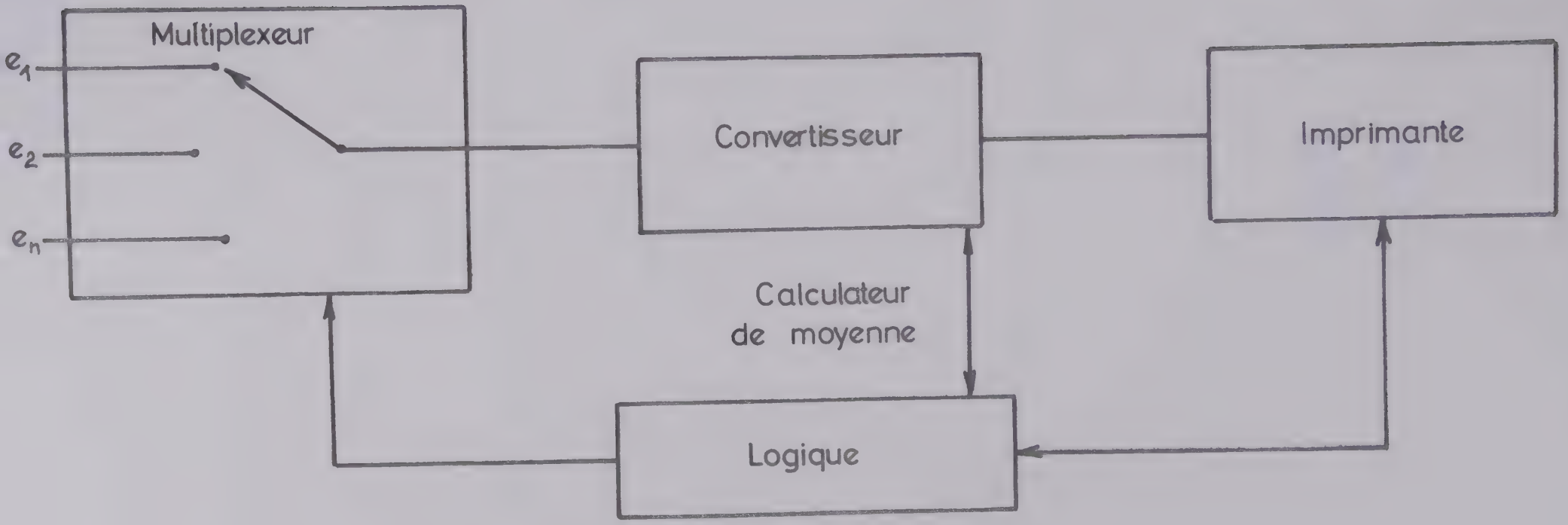


FIG. 11-a

DERIVE

Photorésistance n° 1

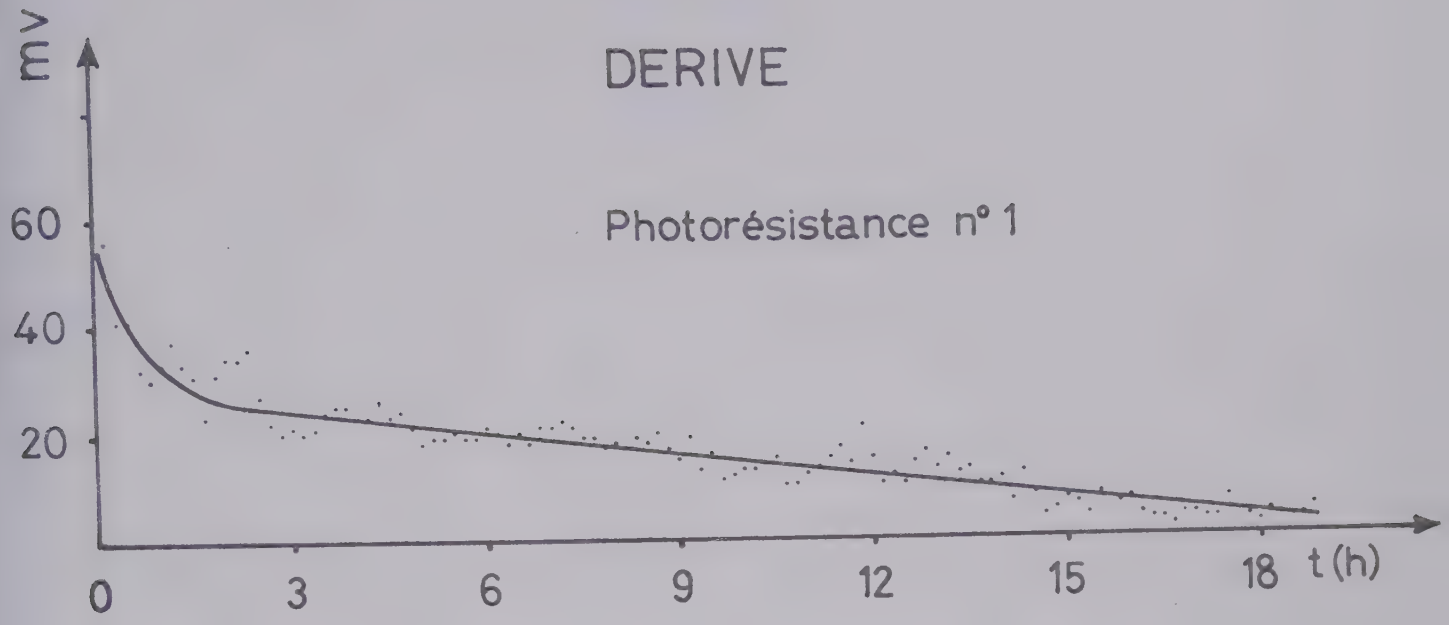


FIG. 11-b

DERIVE

Photorésistance n° 2

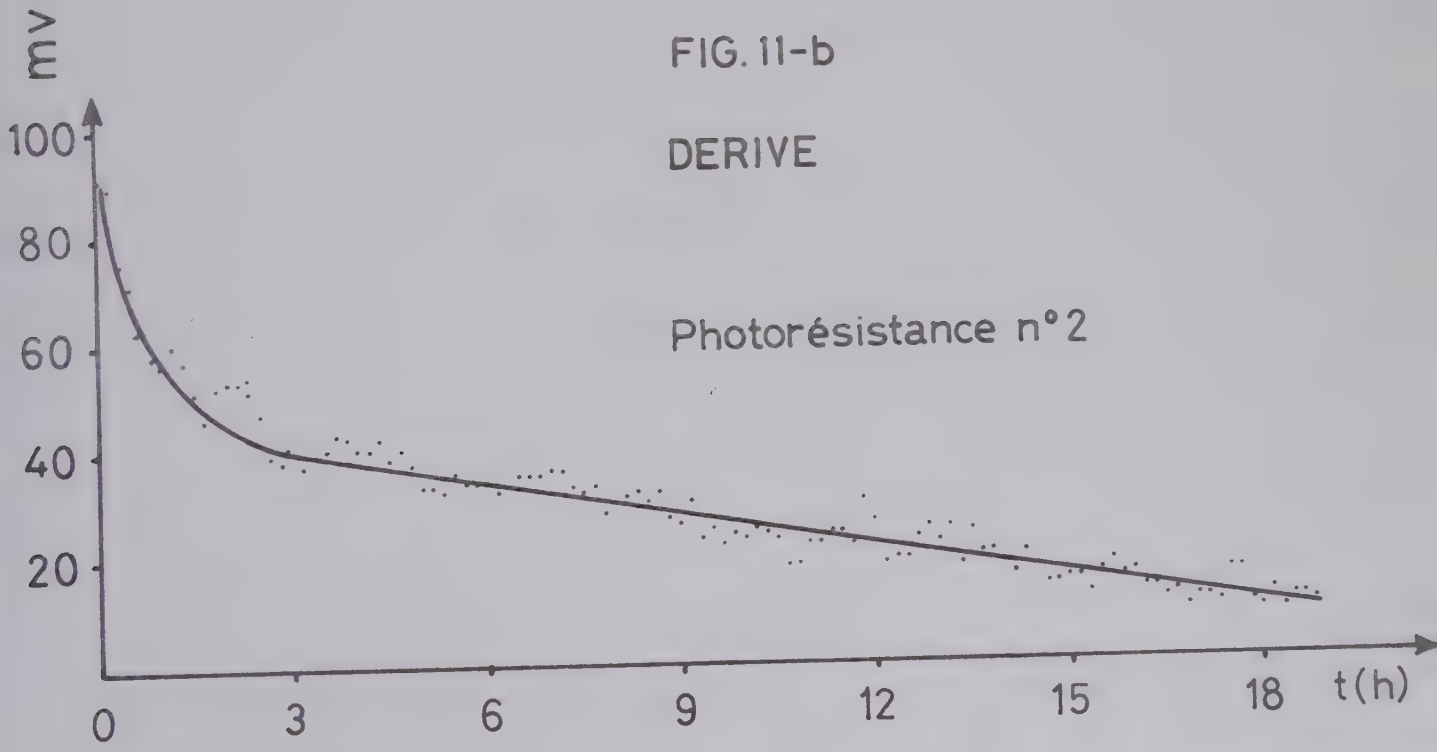


FIG.11-c

DERIVE

Photorésistance n°3

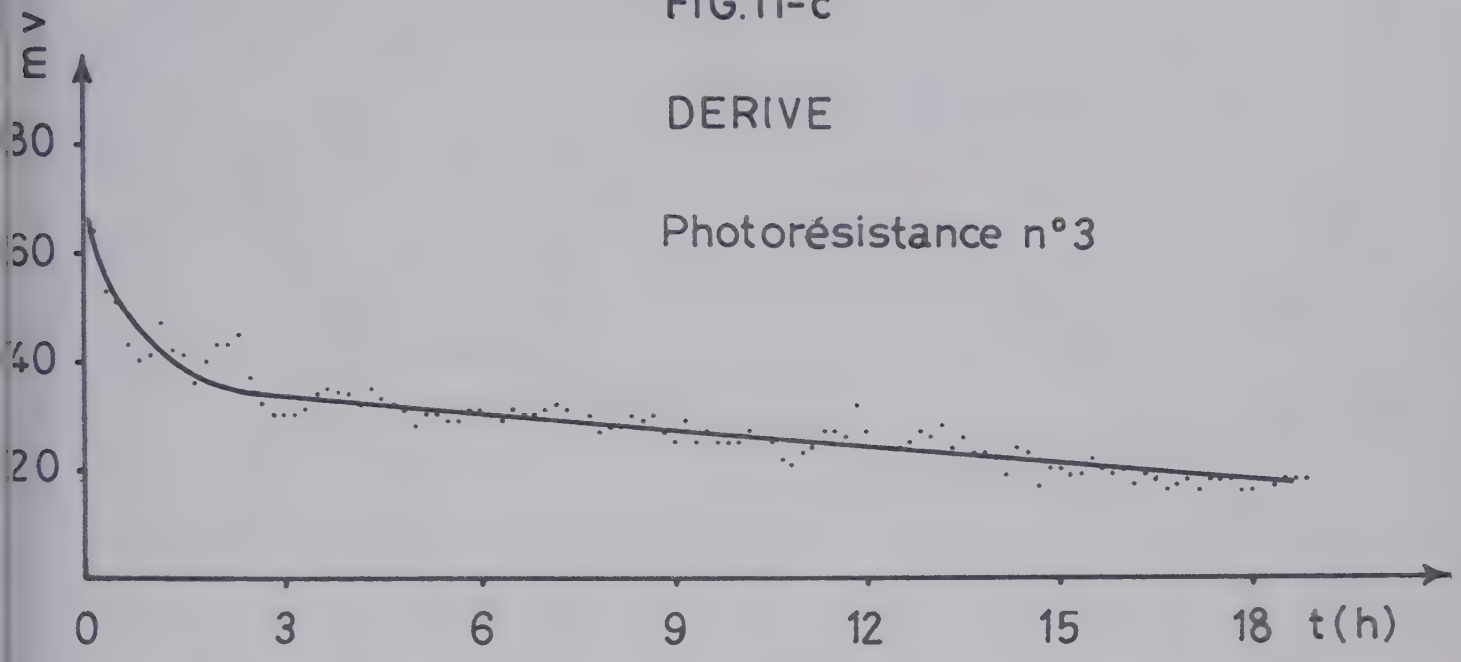
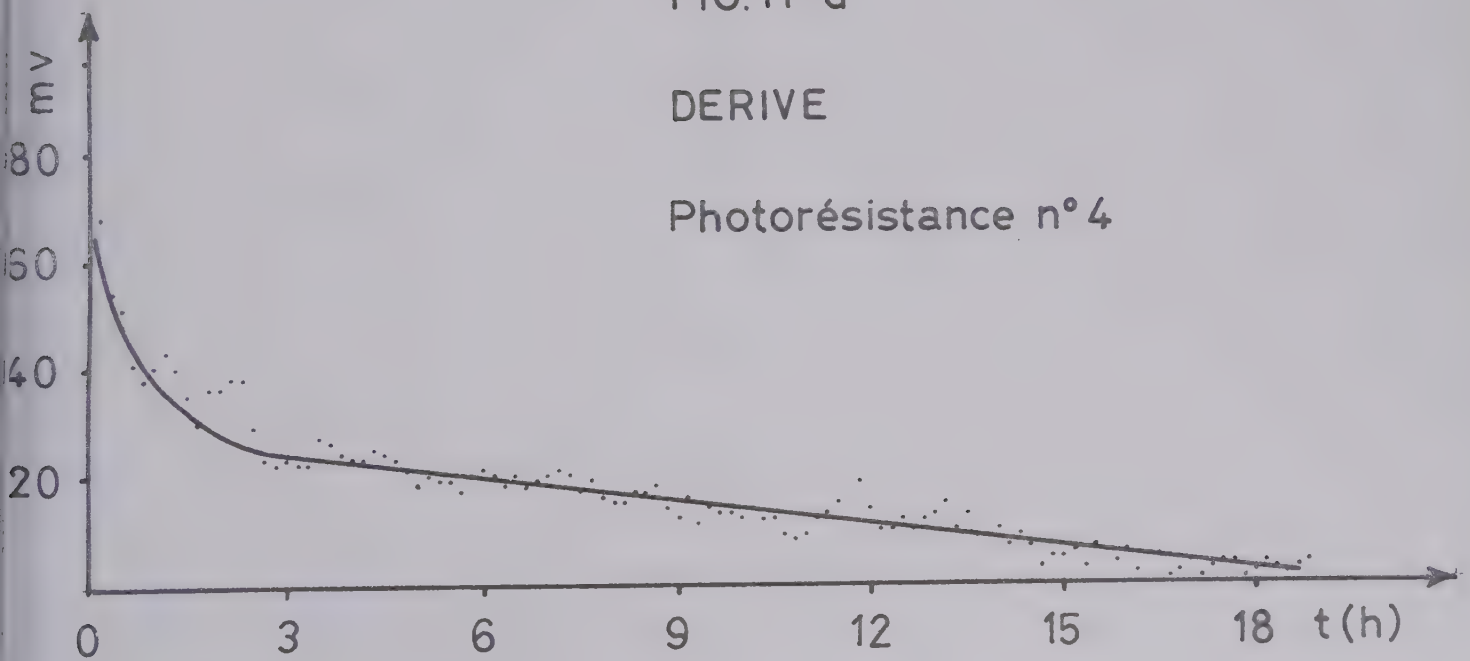


FIG.11-d

DERIVE

Photorésistance n°4



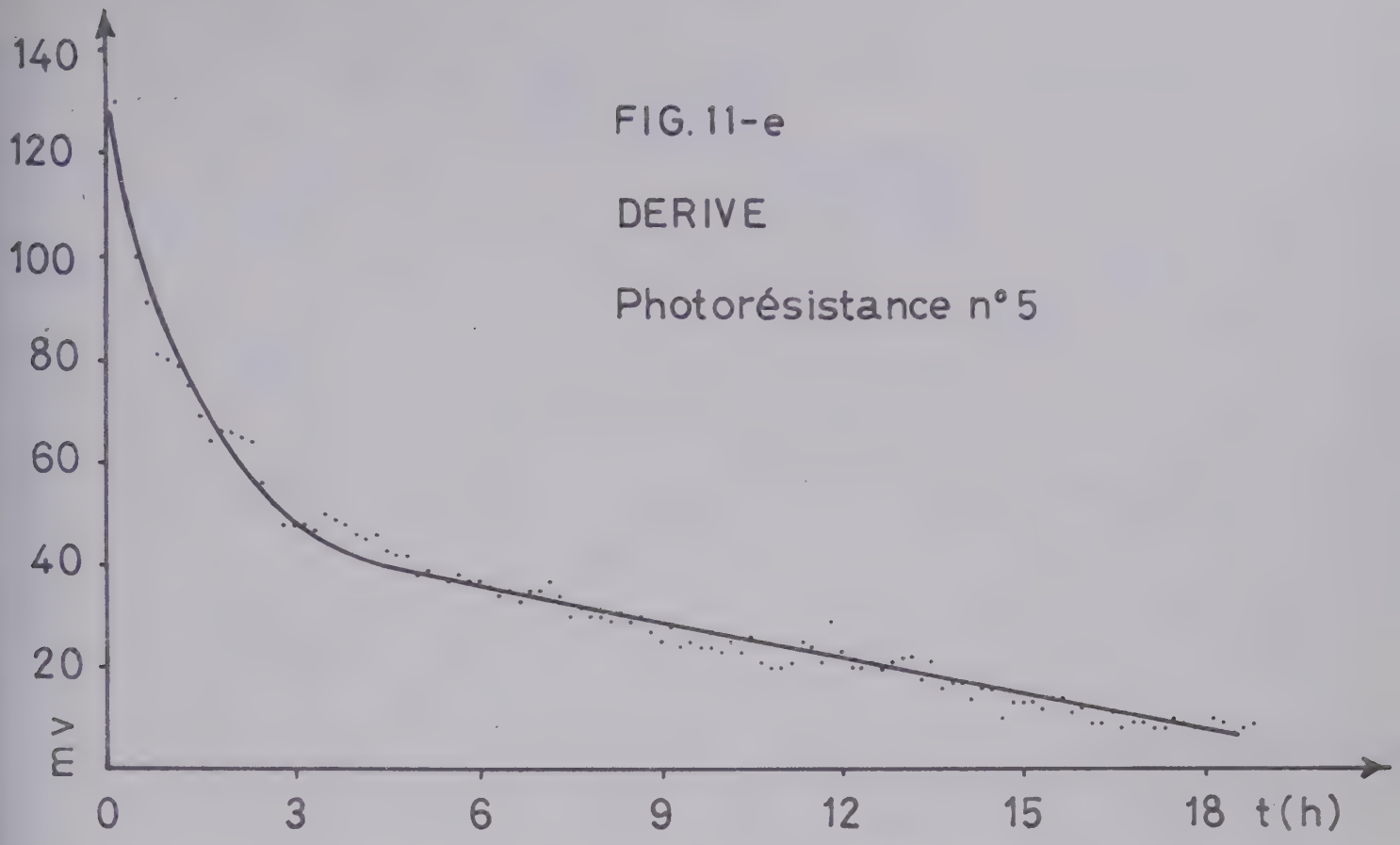


FIG. 11-e

DERIVE

Photorésistance n° 5

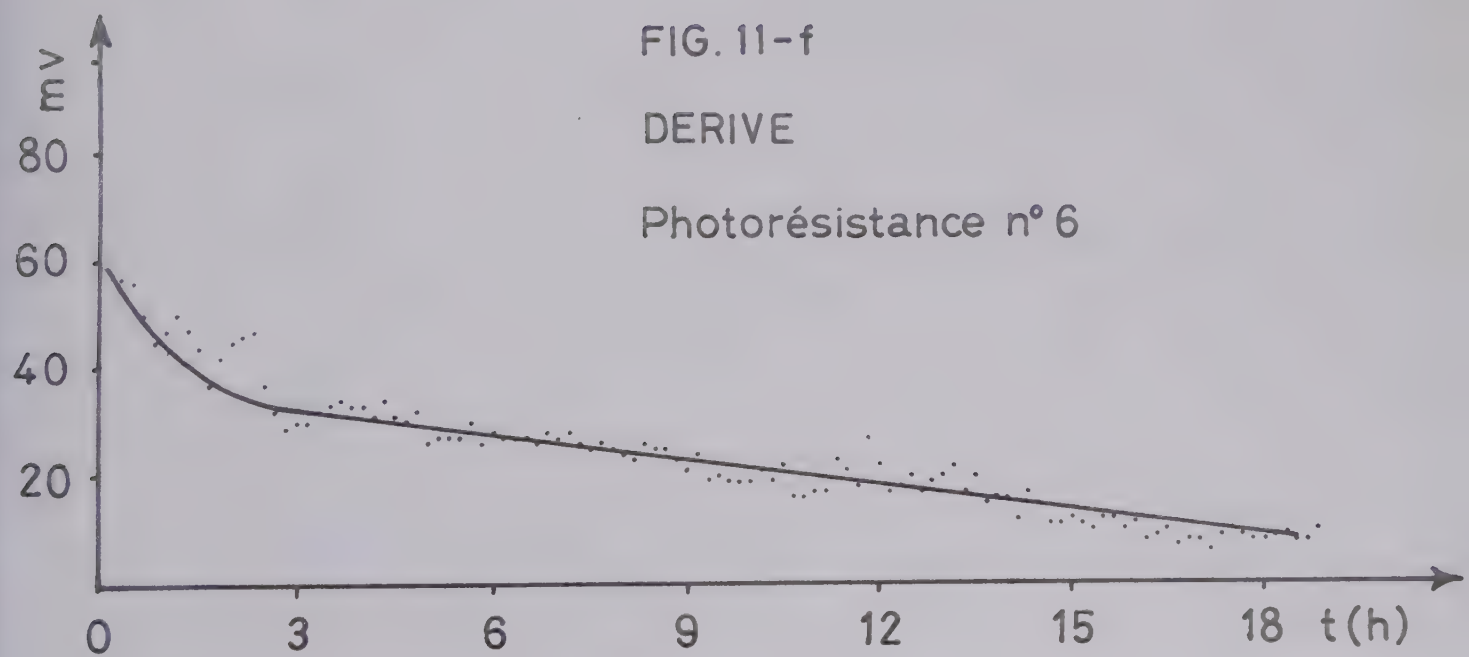


FIG. 11-f

DERIVE

Photorésistance n° 6

FIG.12-a ETALONNAGE AVEC LA CENTRALE DE MESURE

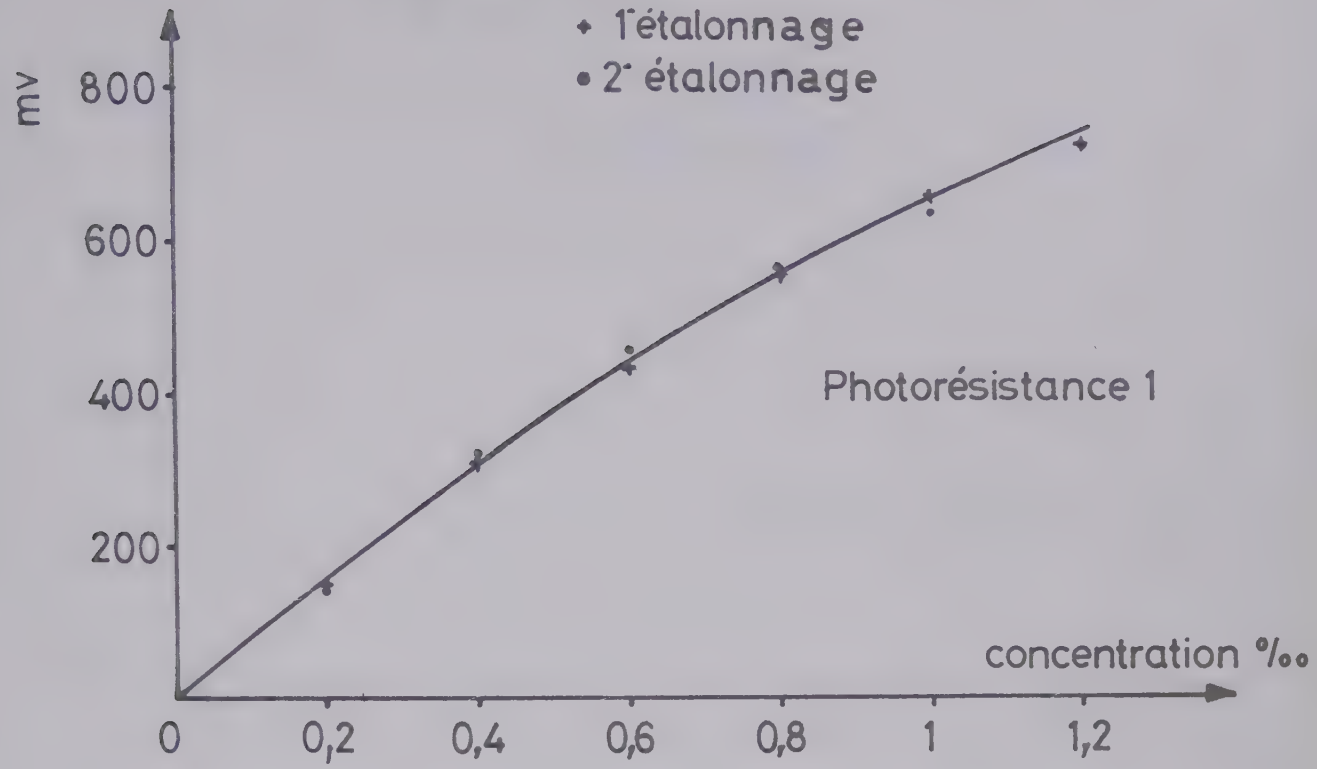


FIG.12-b: ETALONNAGE AVEC LA CENTRALE DE MESURE

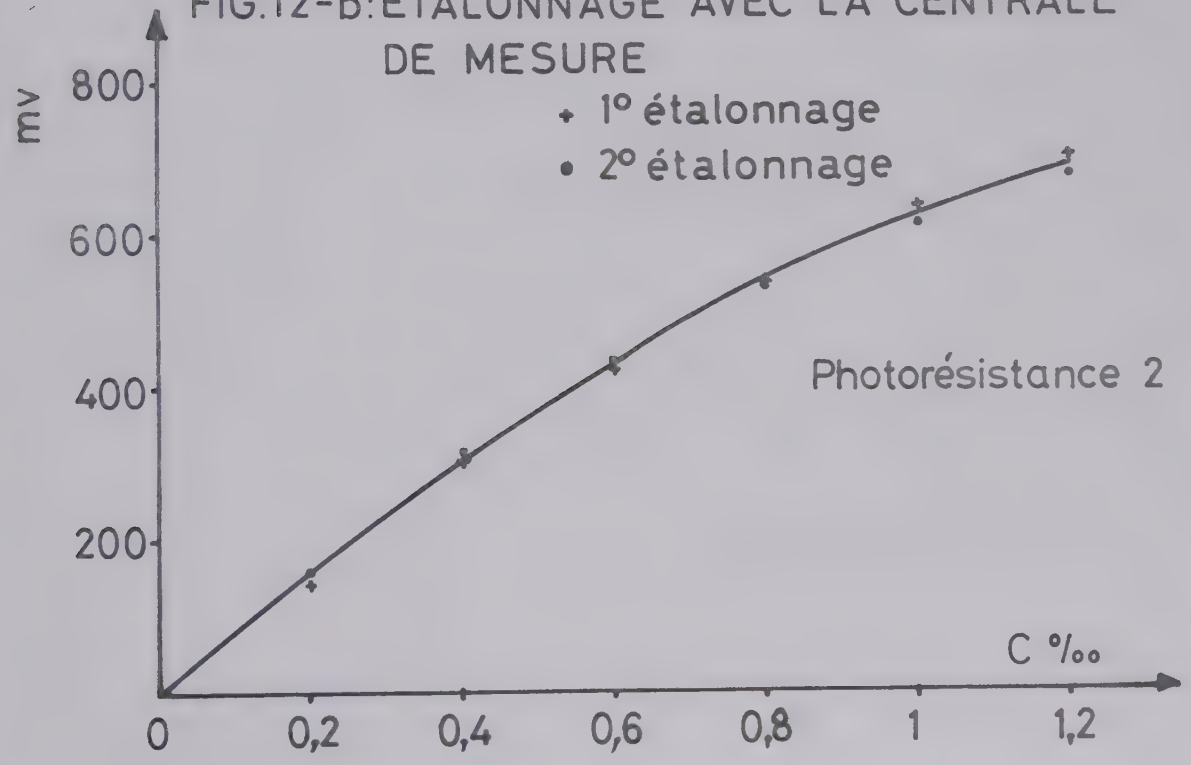


FIG.12-c ETALONNAGE AVEC LA CENTRALE DE MESURE

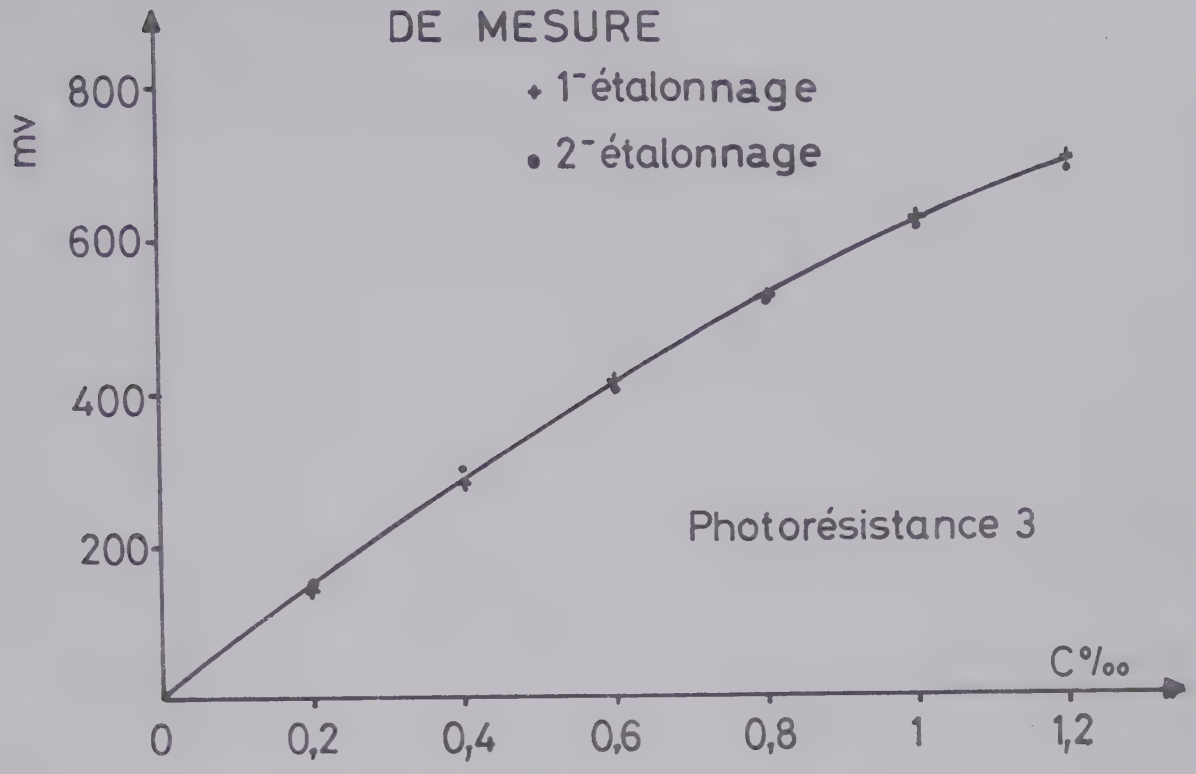


FIG.12-d: ETALONNAGE AVEC LA CENTRALE DE MESURE

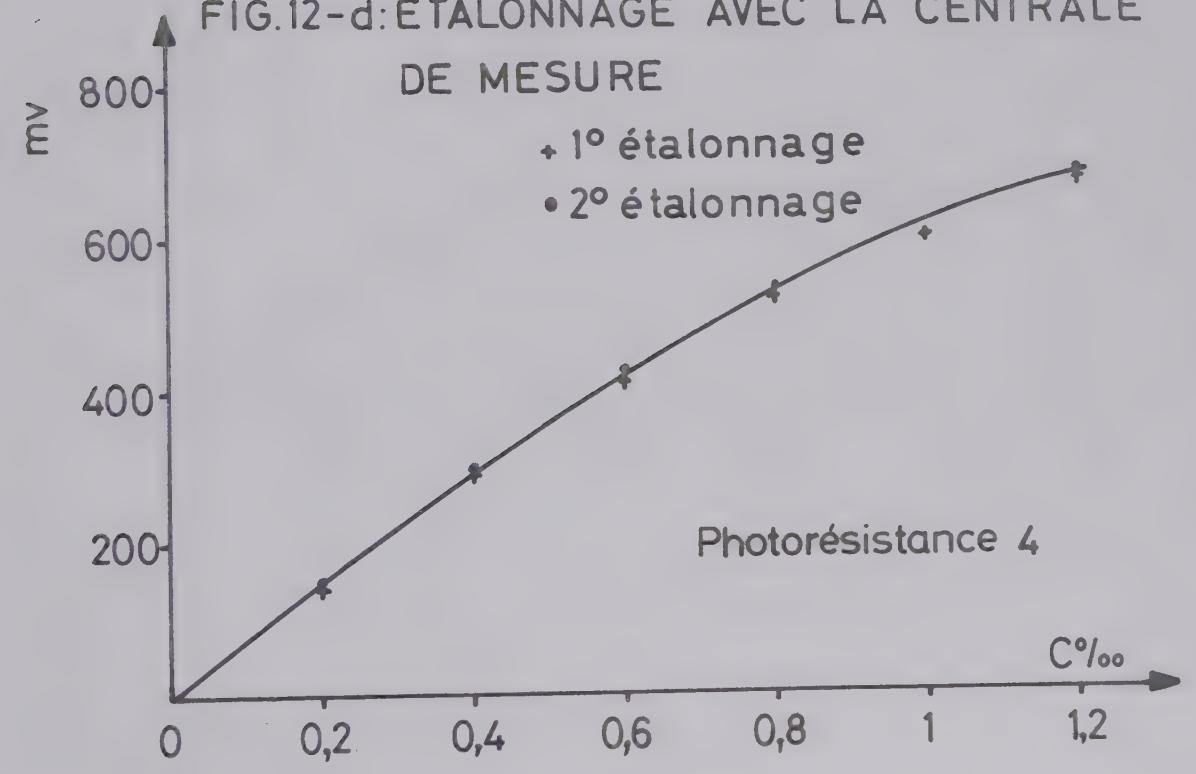


FIG.12-e: ETALONNAGE AVEC LA CENTRALE DE MESURE

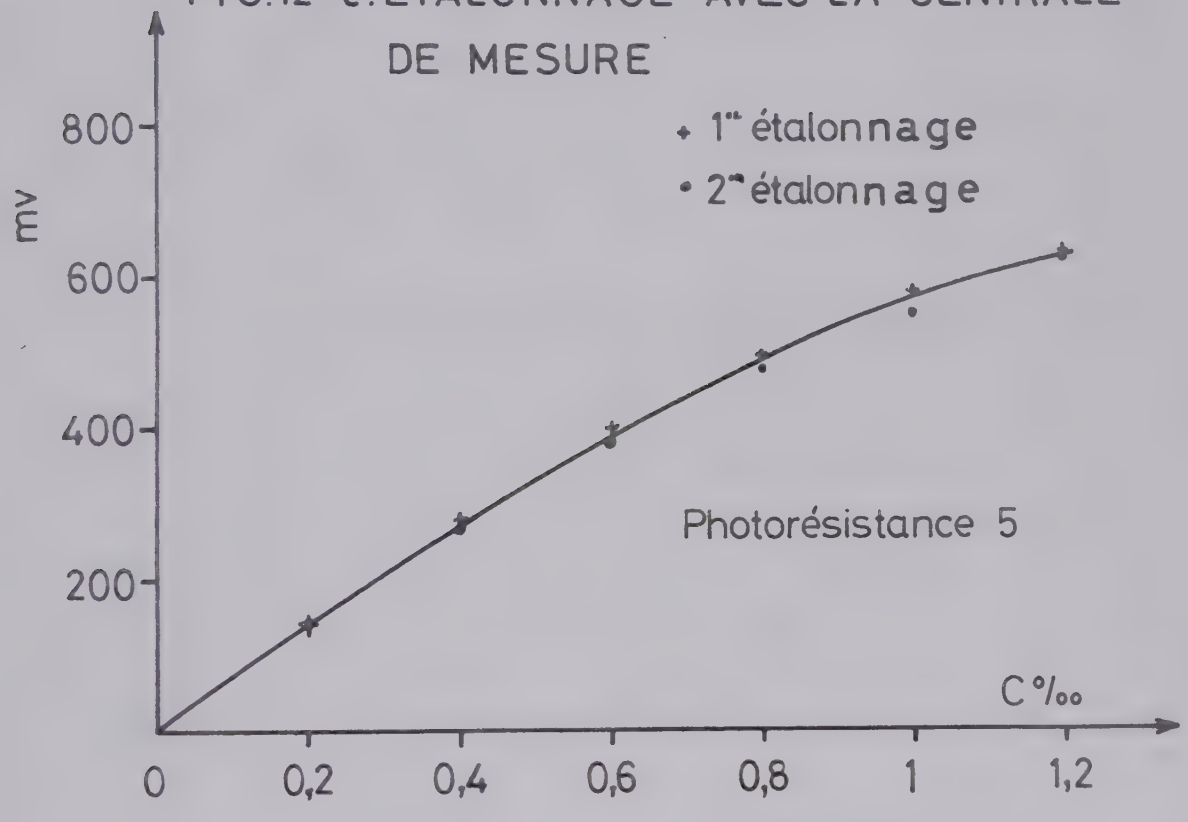


FIG.13-a: ETALONNAGE AVEC L'ENREGISTREUR

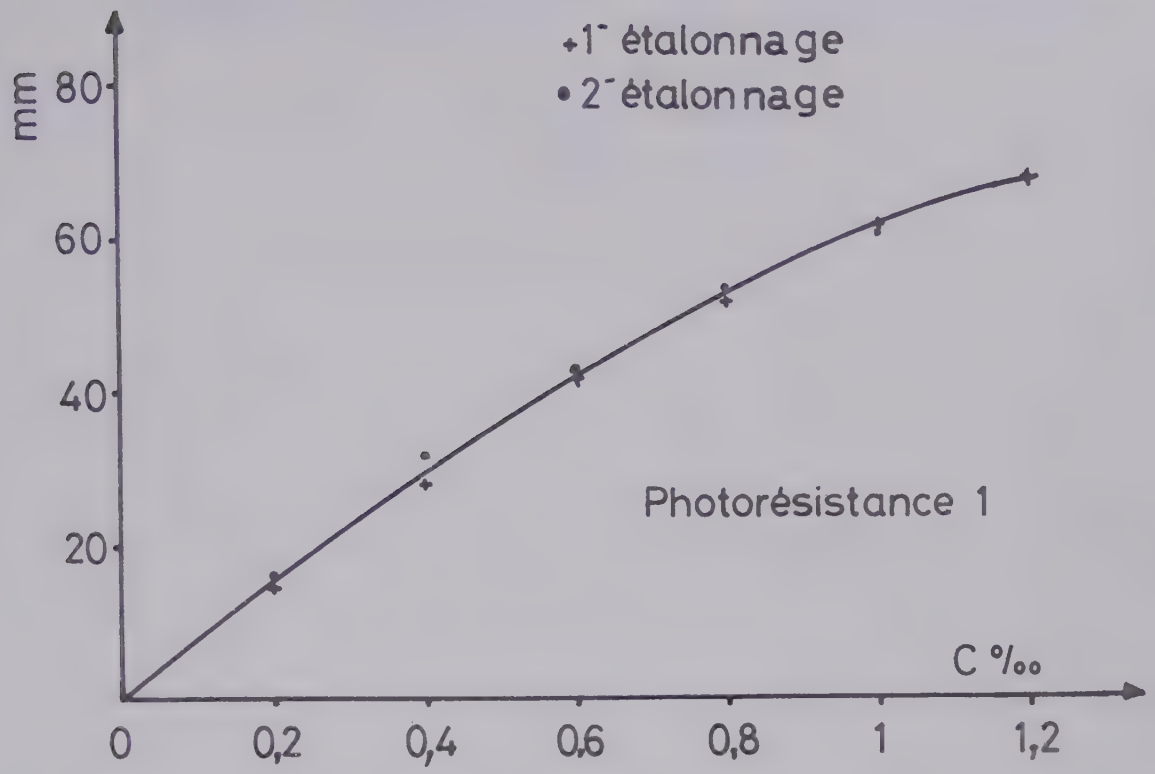


FIG.13-b:ETALONNAGE AVEC L'ENREGISTREUR

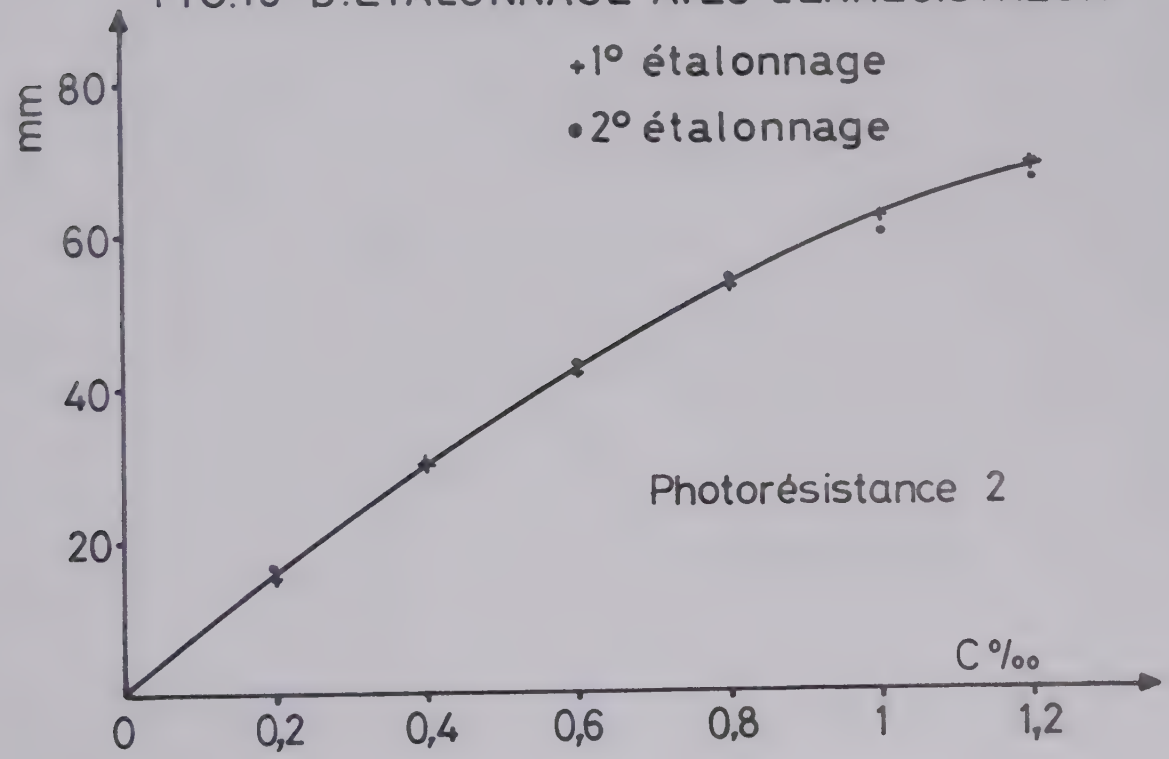


FIG.13-c: ETALONNAGE AVEC L'ENREGISTREUR

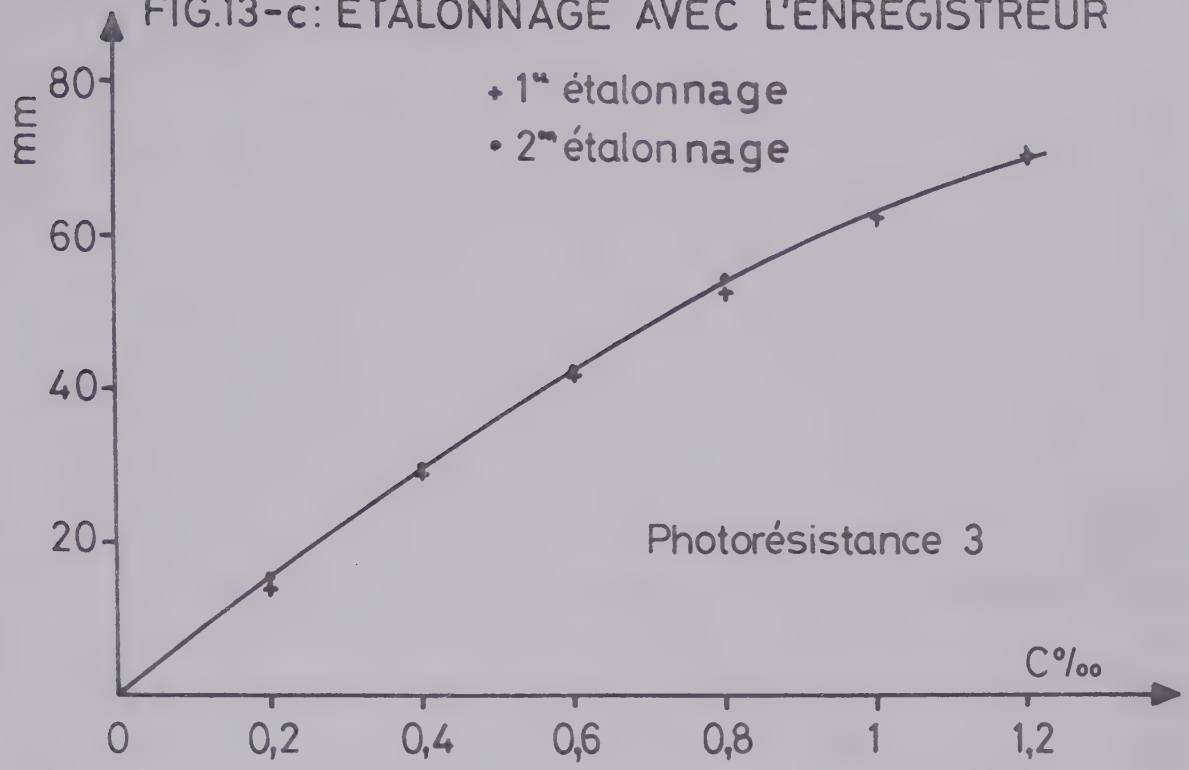


FIG.13-d: ETALONNAGE AVEC L'ENREGISTREUR

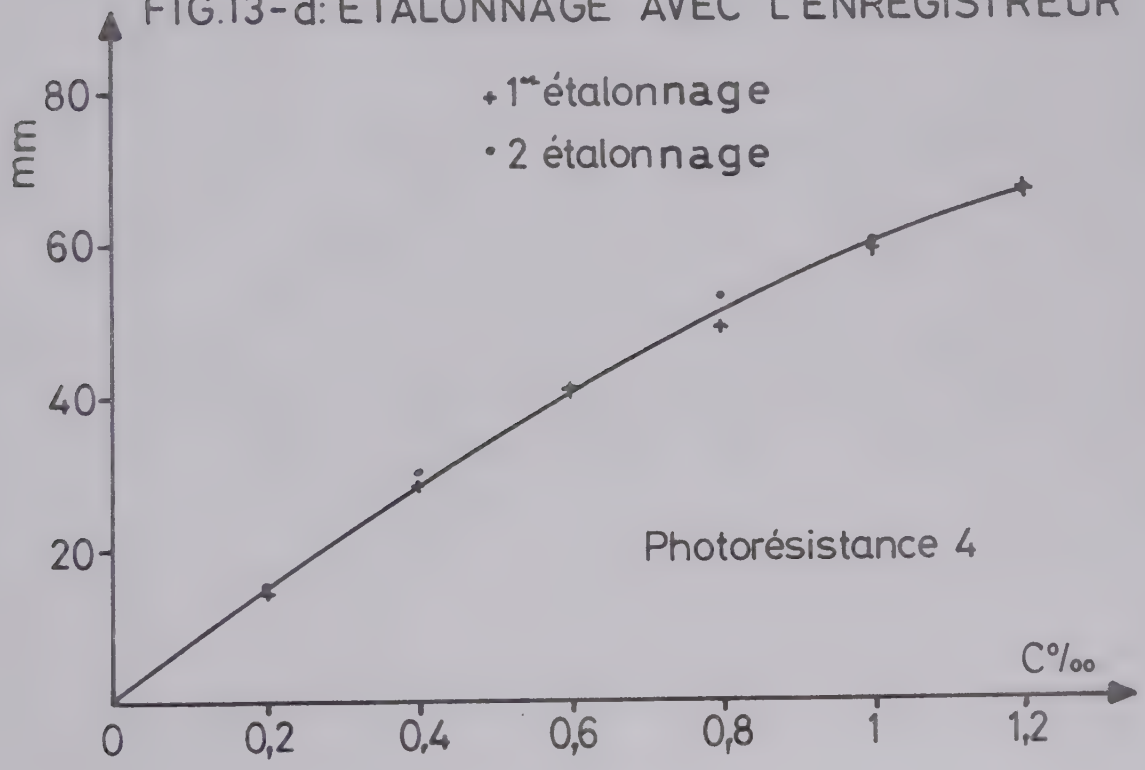
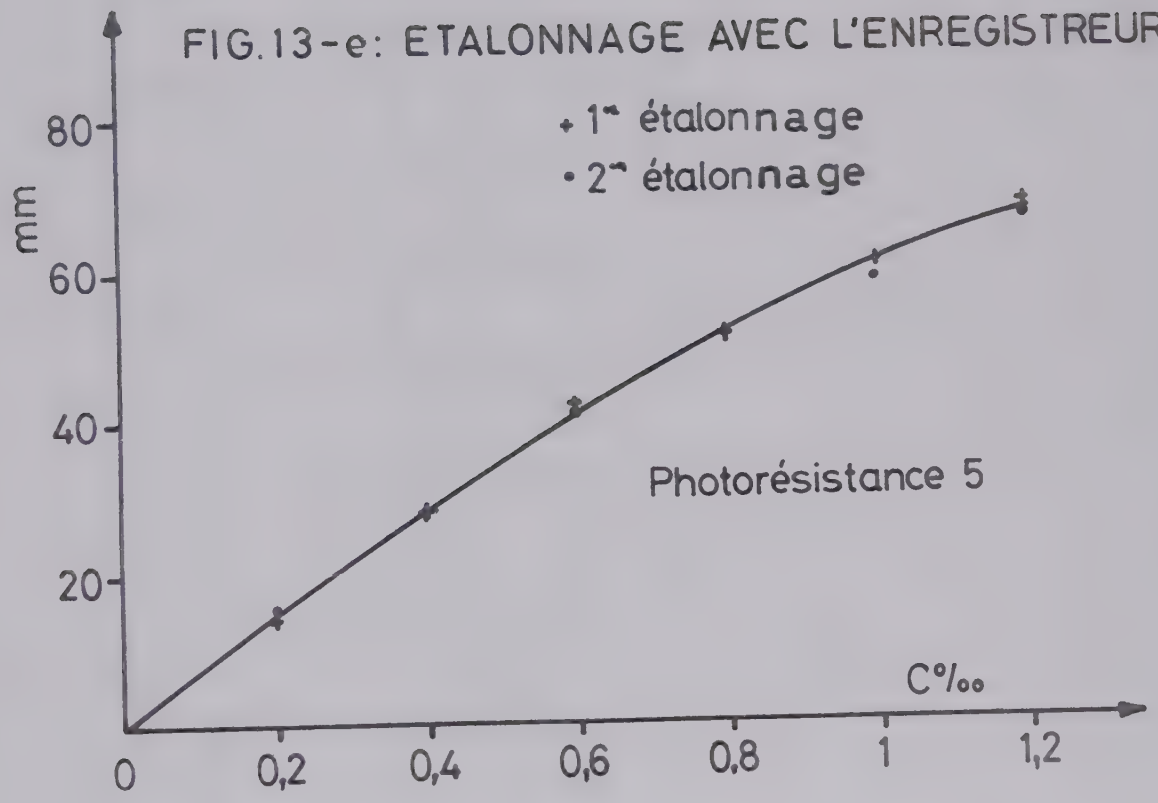


FIG.13-e: ETALONNAGE AVEC L'ENREGISTREUR



SCHEMA DE LA COLONNE

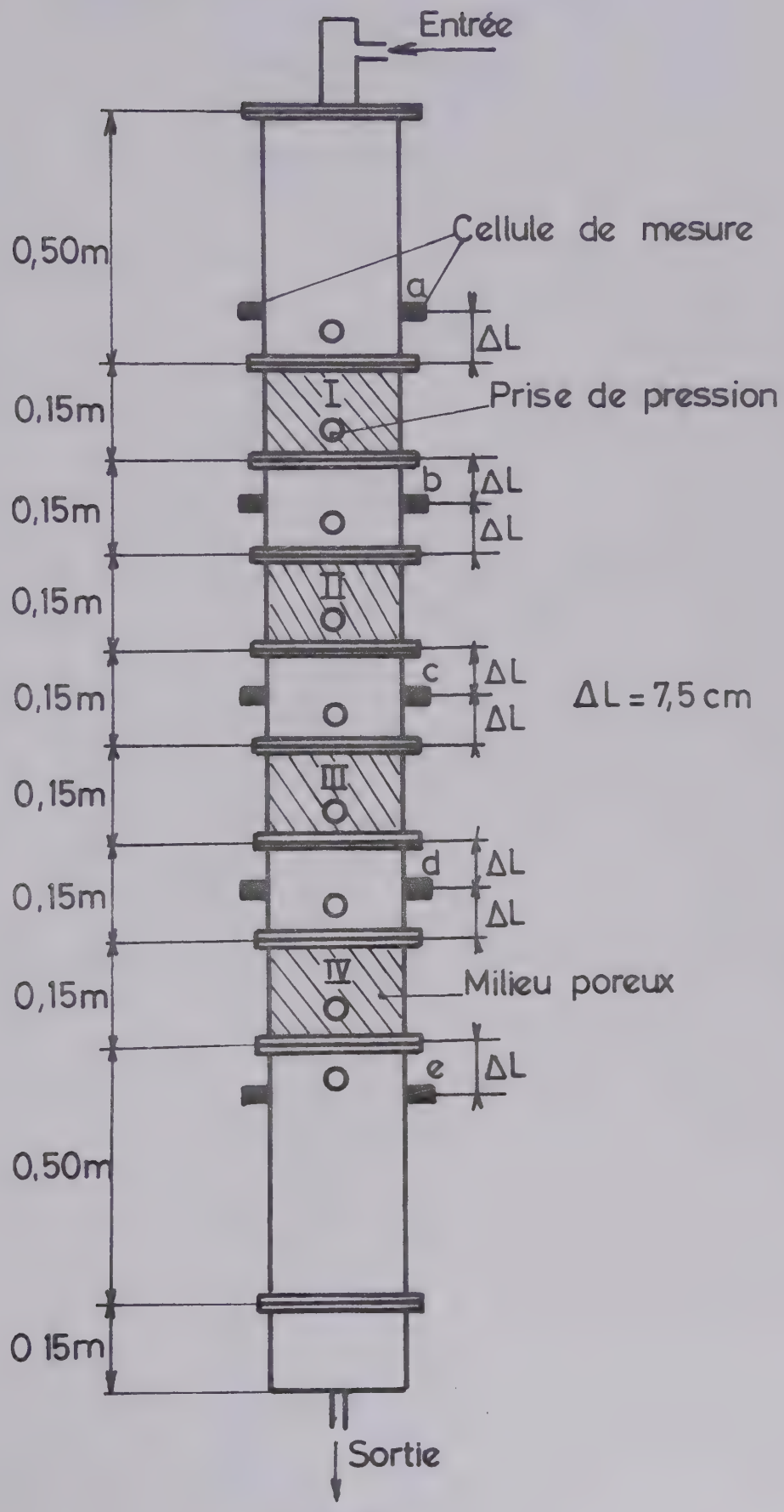


FIGURE 14

FIG.15: ALLURE DES COURBES DE CONCENTRATION EN FONCTION DU TEMPS ET LEURS CORRECTIONS.

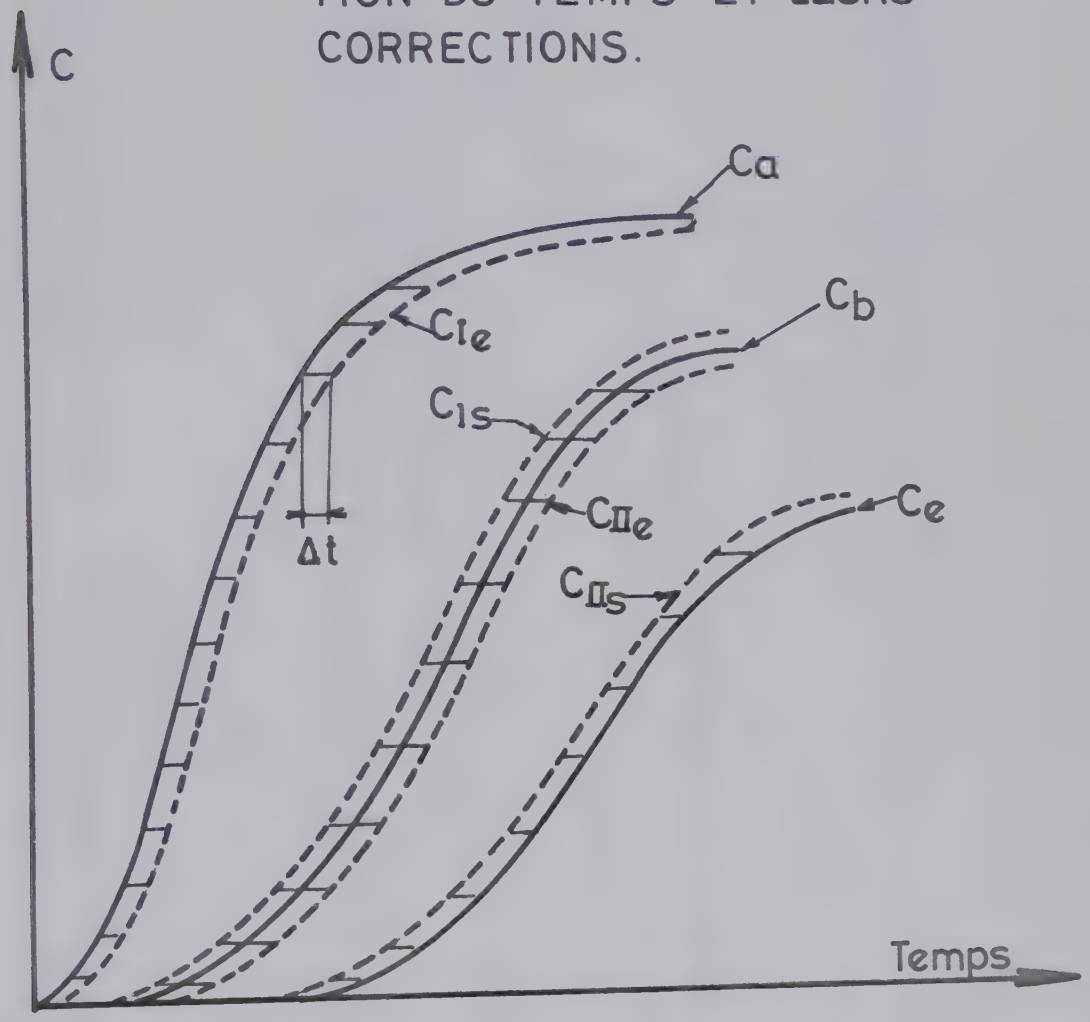
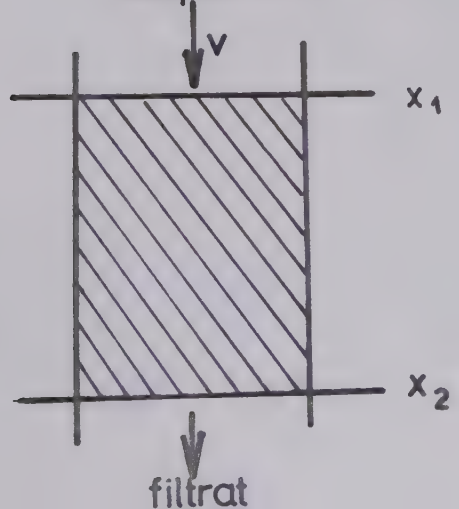
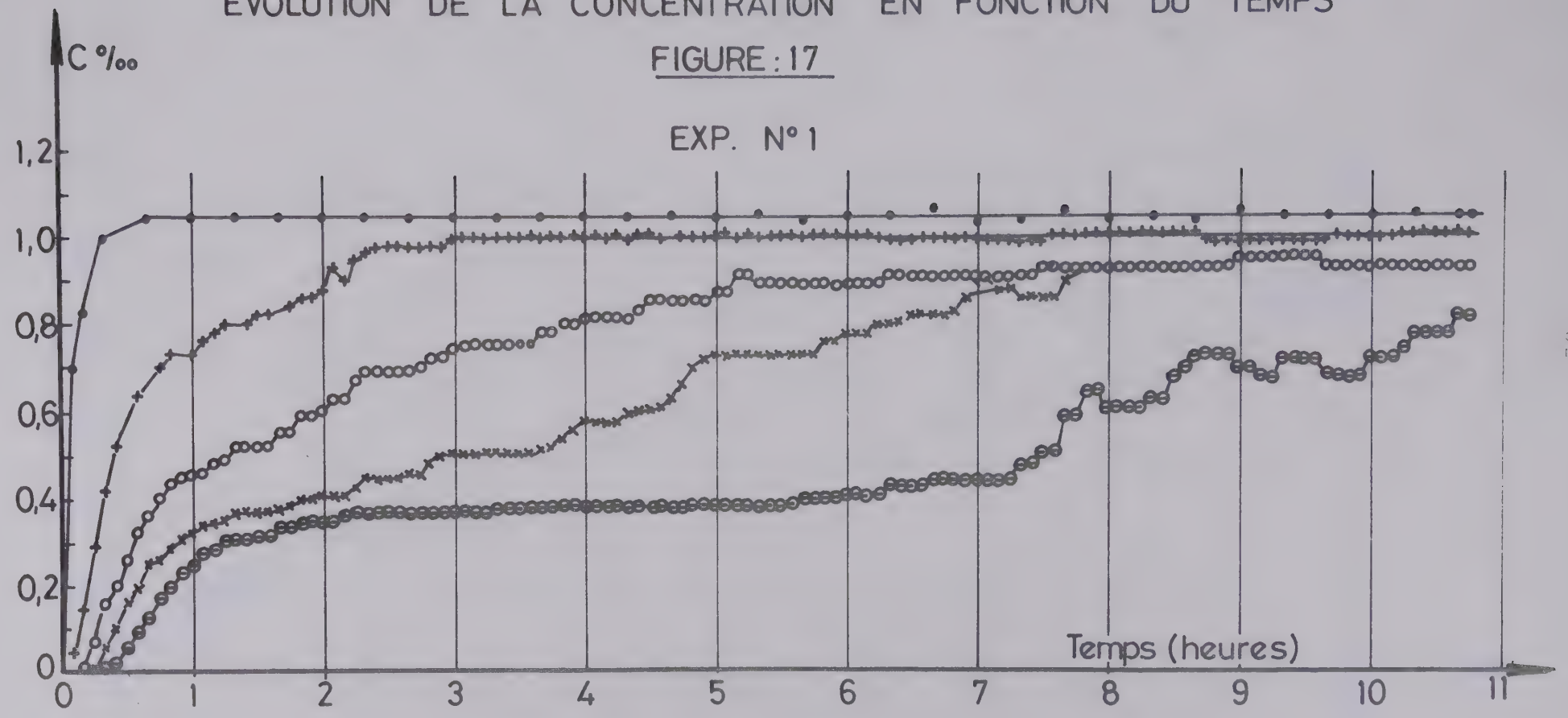


FIG. 16



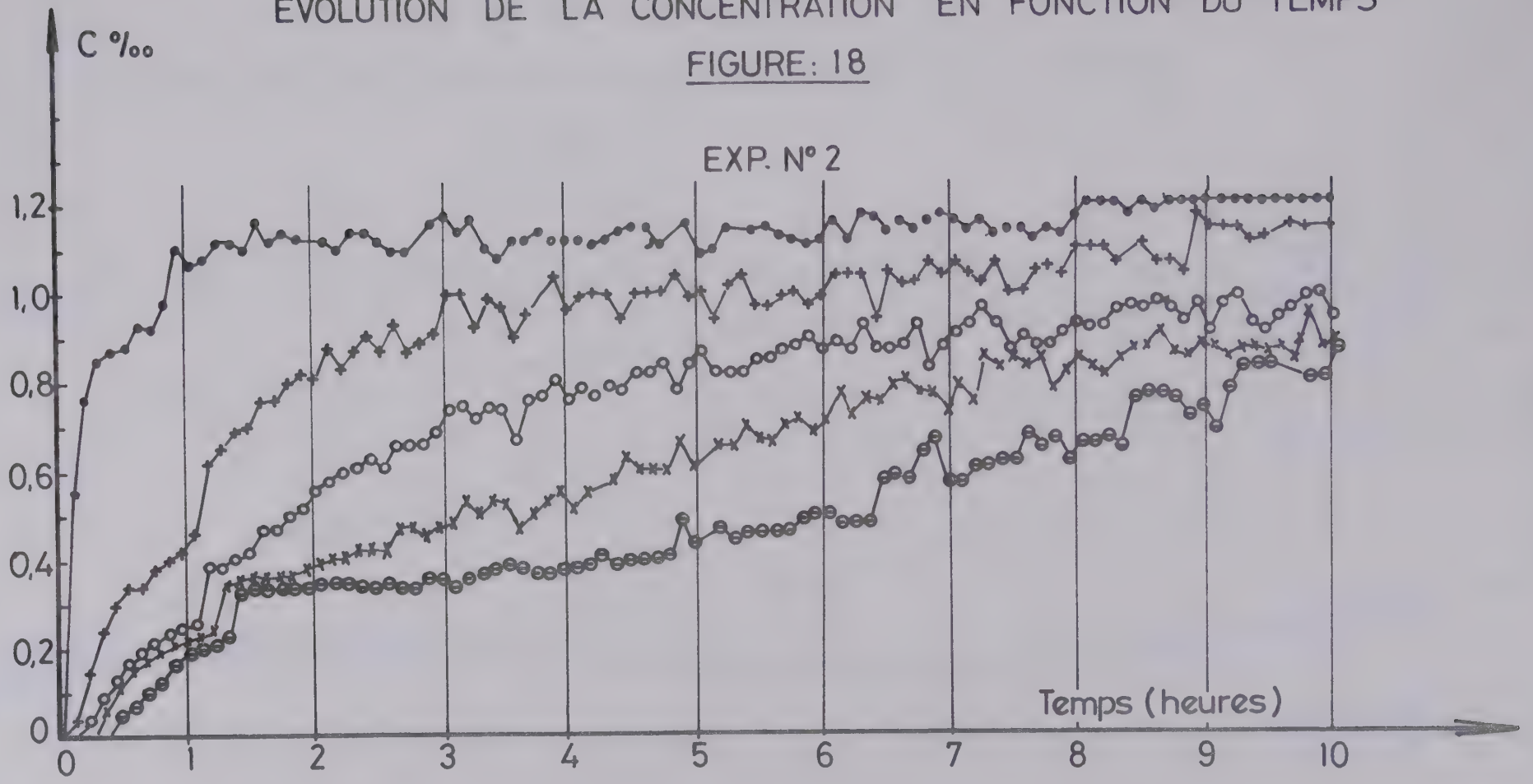
EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FONCTION DU TEMPS

FIGURE : 17



EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FONCTION DU TEMPS

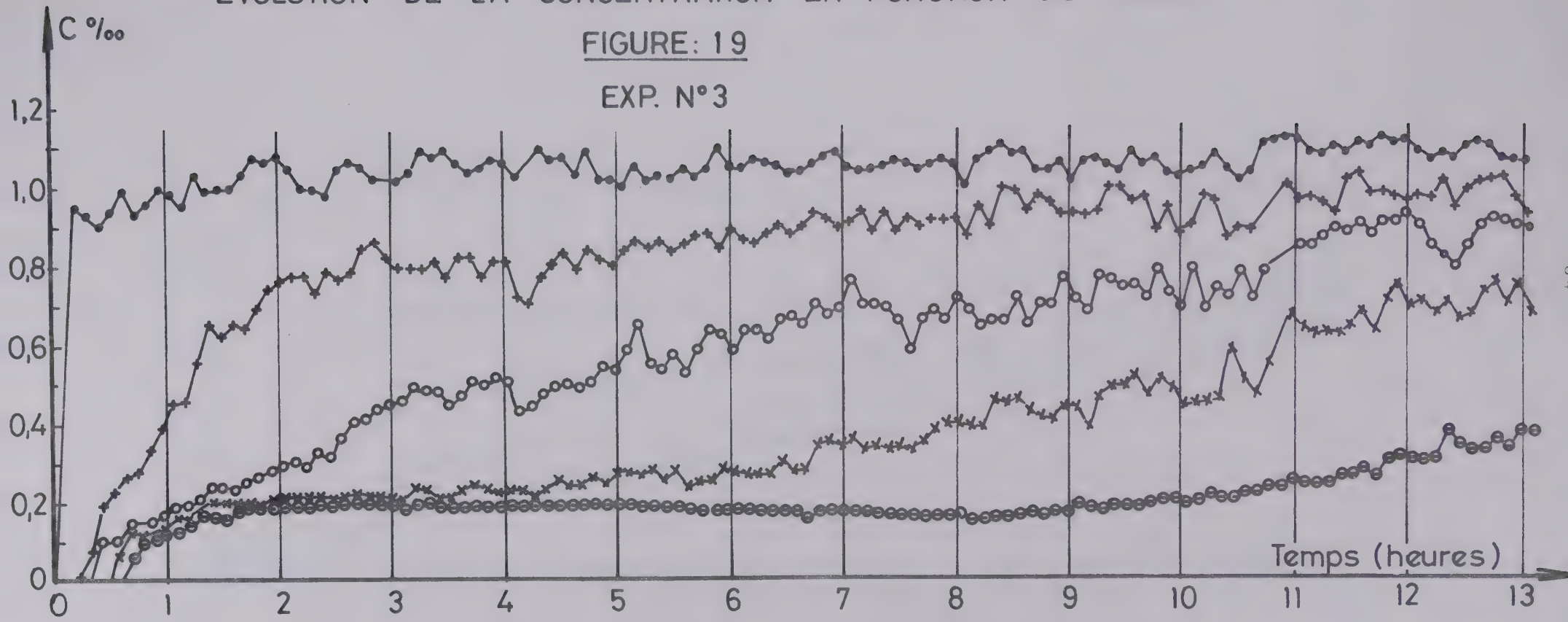
FIGURE: 18



EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FONCTION DU TEMPS

FIGURE: 19

EXP. N°3



EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FONCTION DU TEMPS

FIGURE : 20

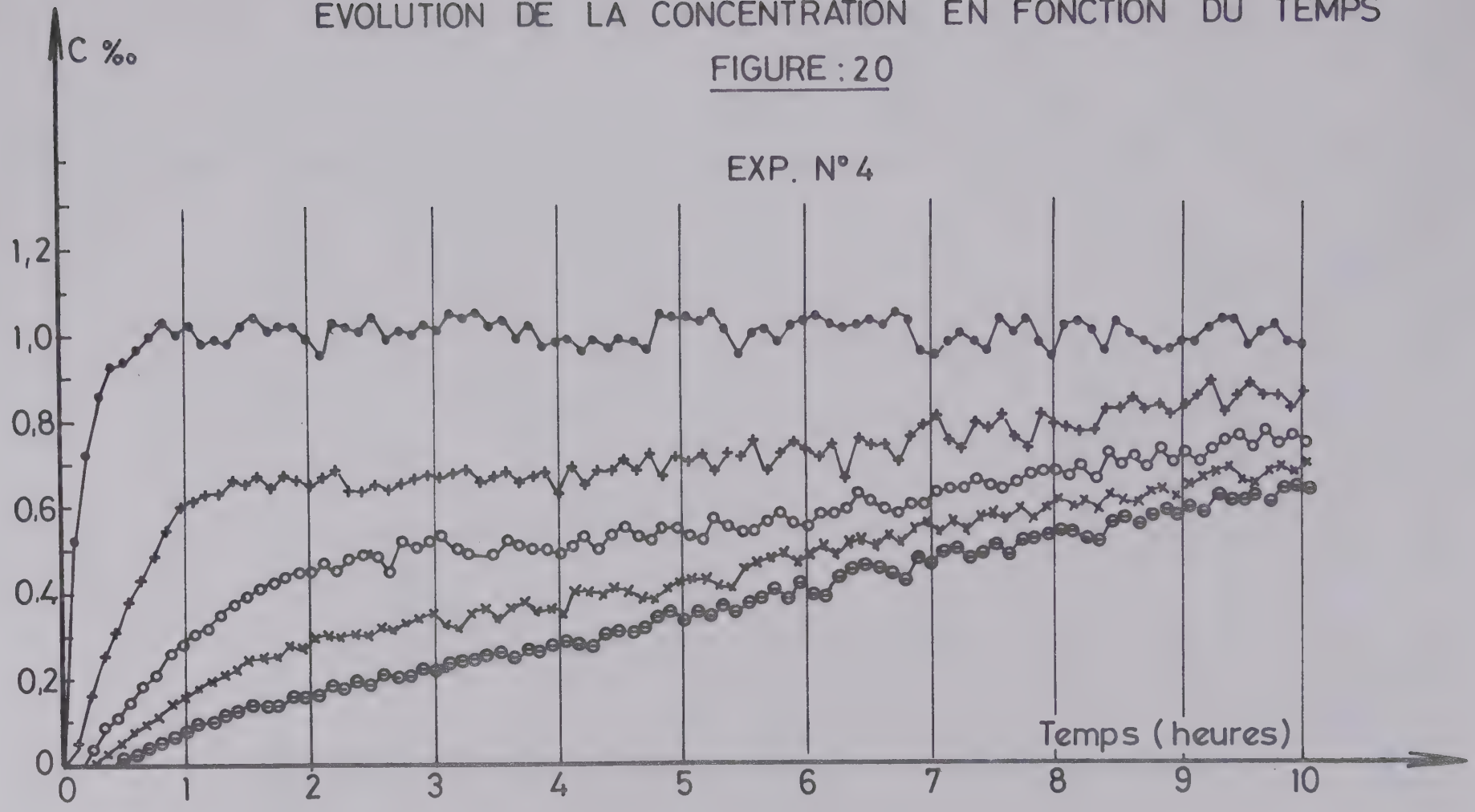


FIG.21: COMPARAISON ENTRE LES RETENTIONS PARTIELLES OBTENUES PAR LA METHODE PHOTOELECTRIQUE ET PAR PESEE

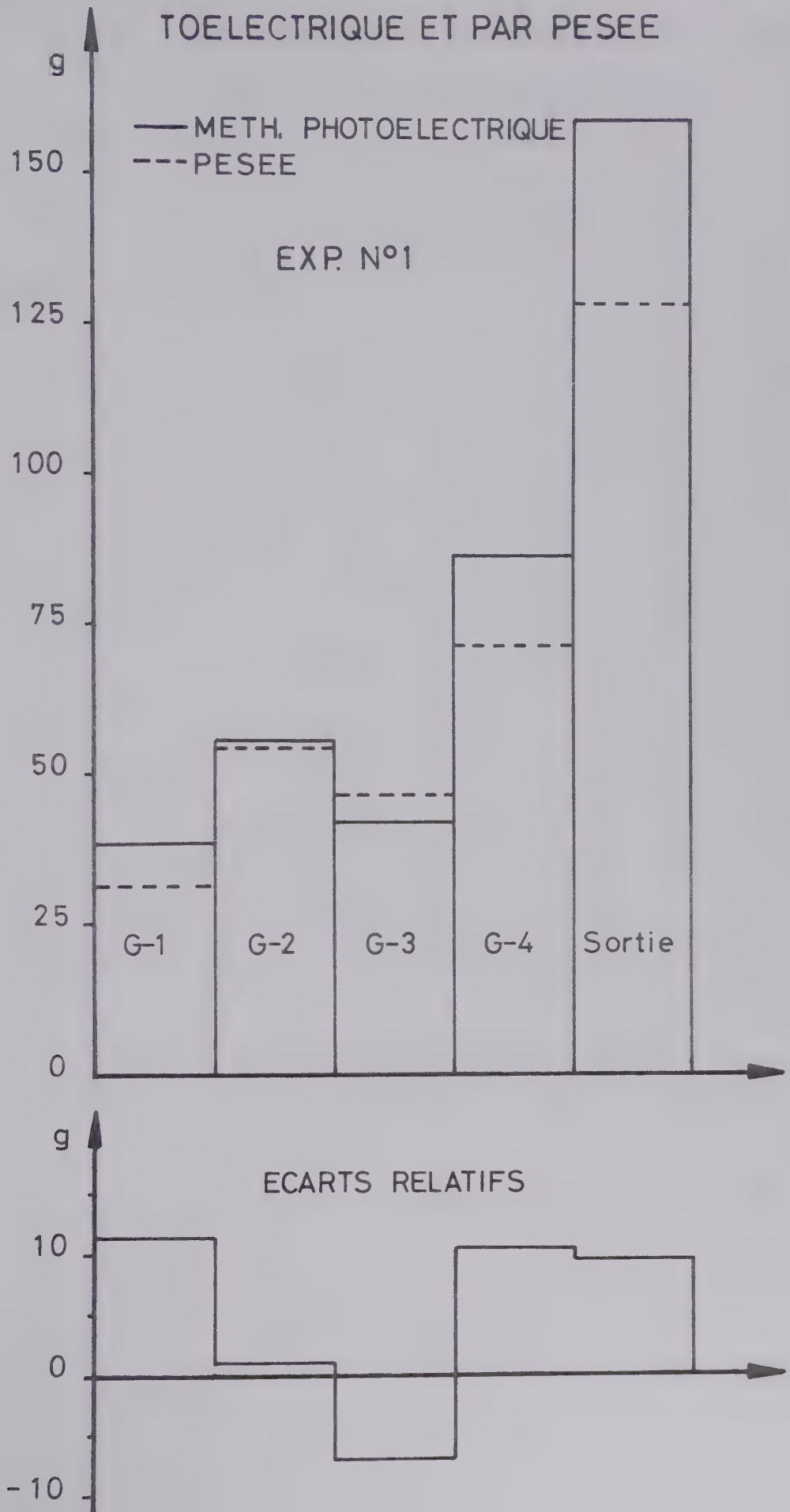


FIG.22 : COMPARAISON ENTRE LES RETETIONS PARTIELLES OBTENUES PAR LA METHODE PHOTOELECTRIQUE ET PAR PESEE

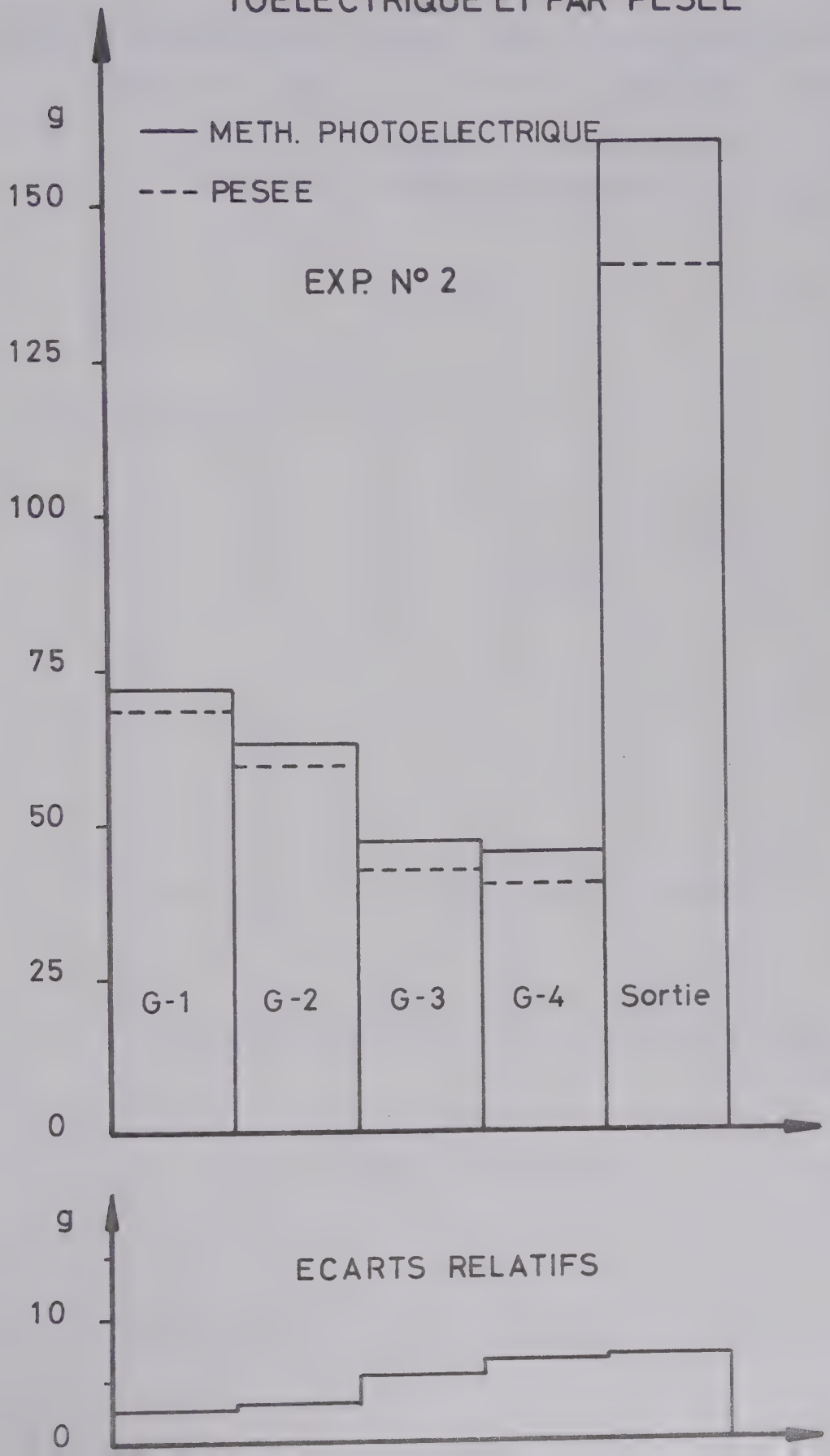


FIG.23: COMPARAISON ENTRE LES RETENTIONS PARTIELLES OBTENUES PAR LA METHODE PHOTOELECTRIQUE ET PAR PESEE

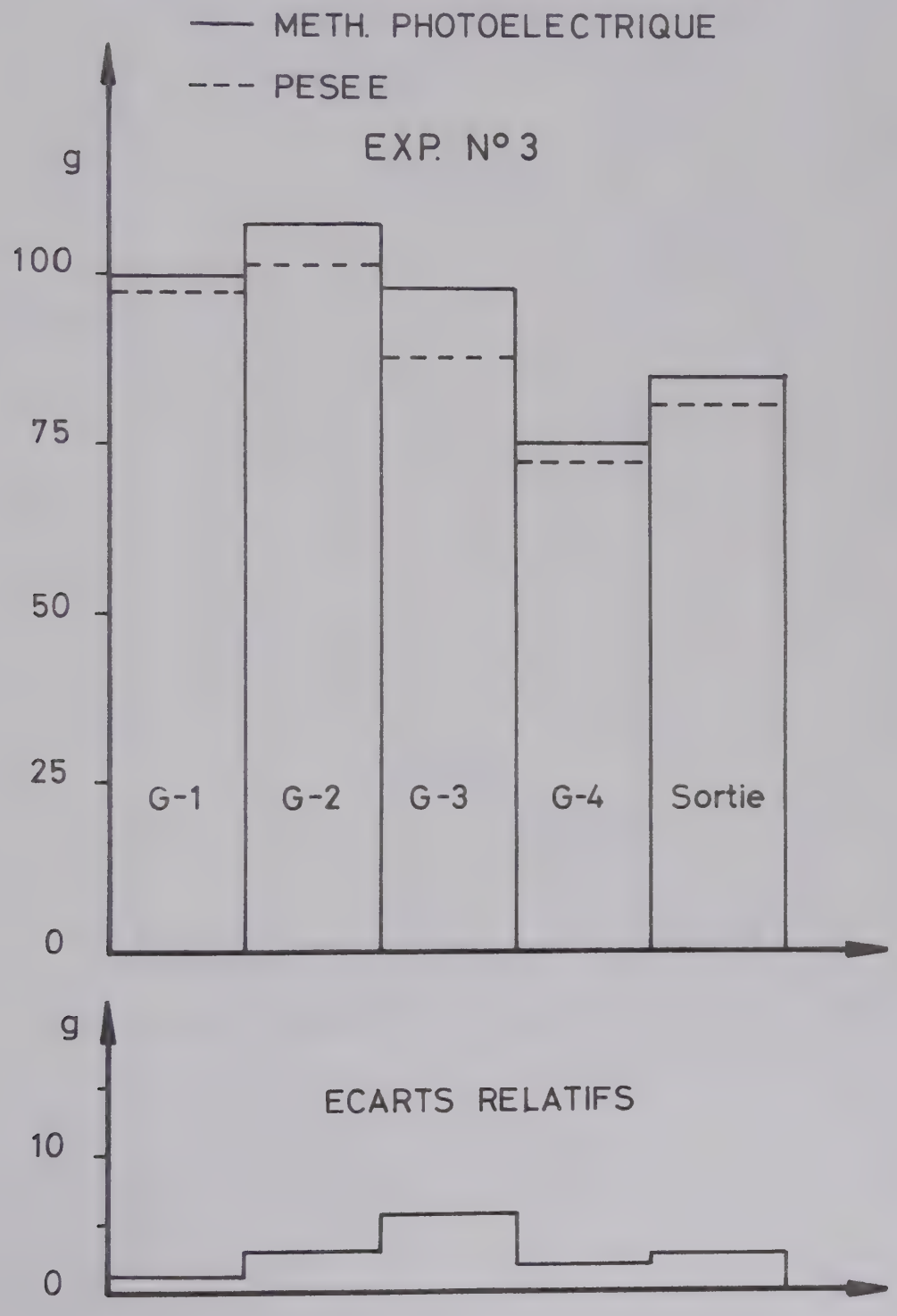


FIG.24: COMPARAISON ENTRE LES RETENTIONS PARTIELLES OBTENUES PAR LA METHODE PHOTOELECTRIQUE ET PAR PESEE

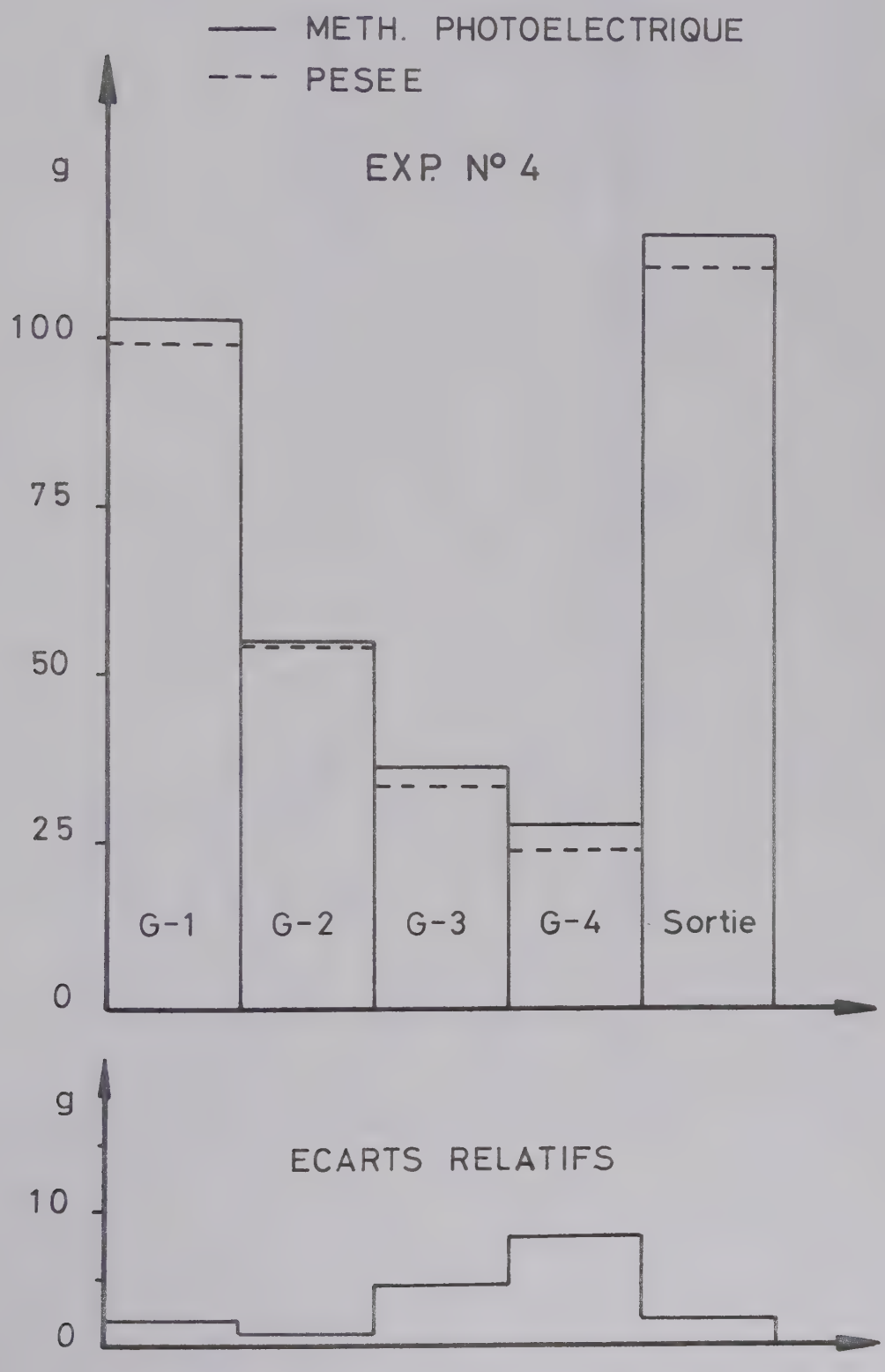


FIG. 25: COURBES DE RETENTION $\sigma_t(x)$

milieu poreux discontinu

EXP. N° 2

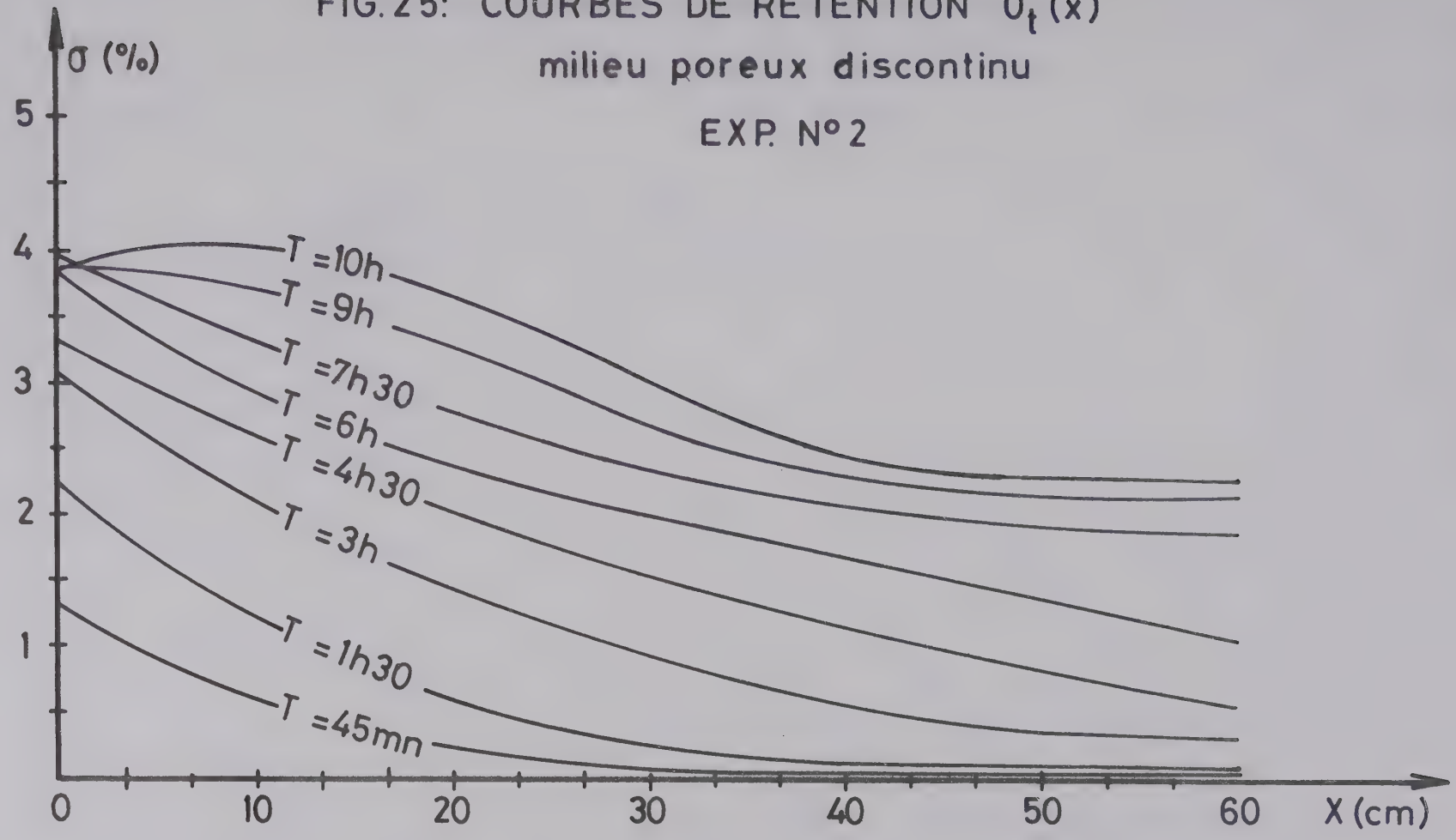
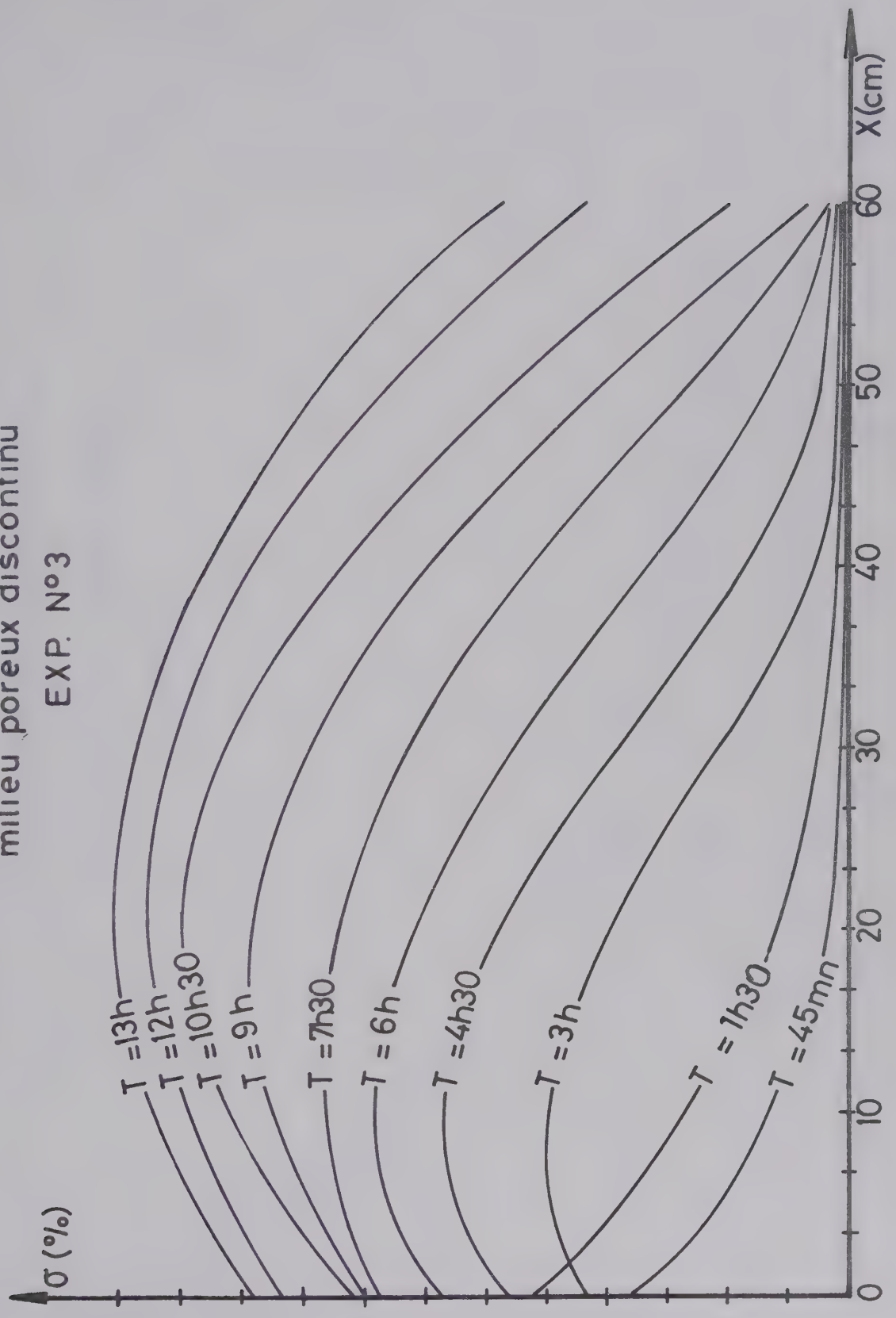


FIG.26: COURBES DE RETENTION $\sigma_t(x)$
milieu poreux discontinu
EXP. N°3



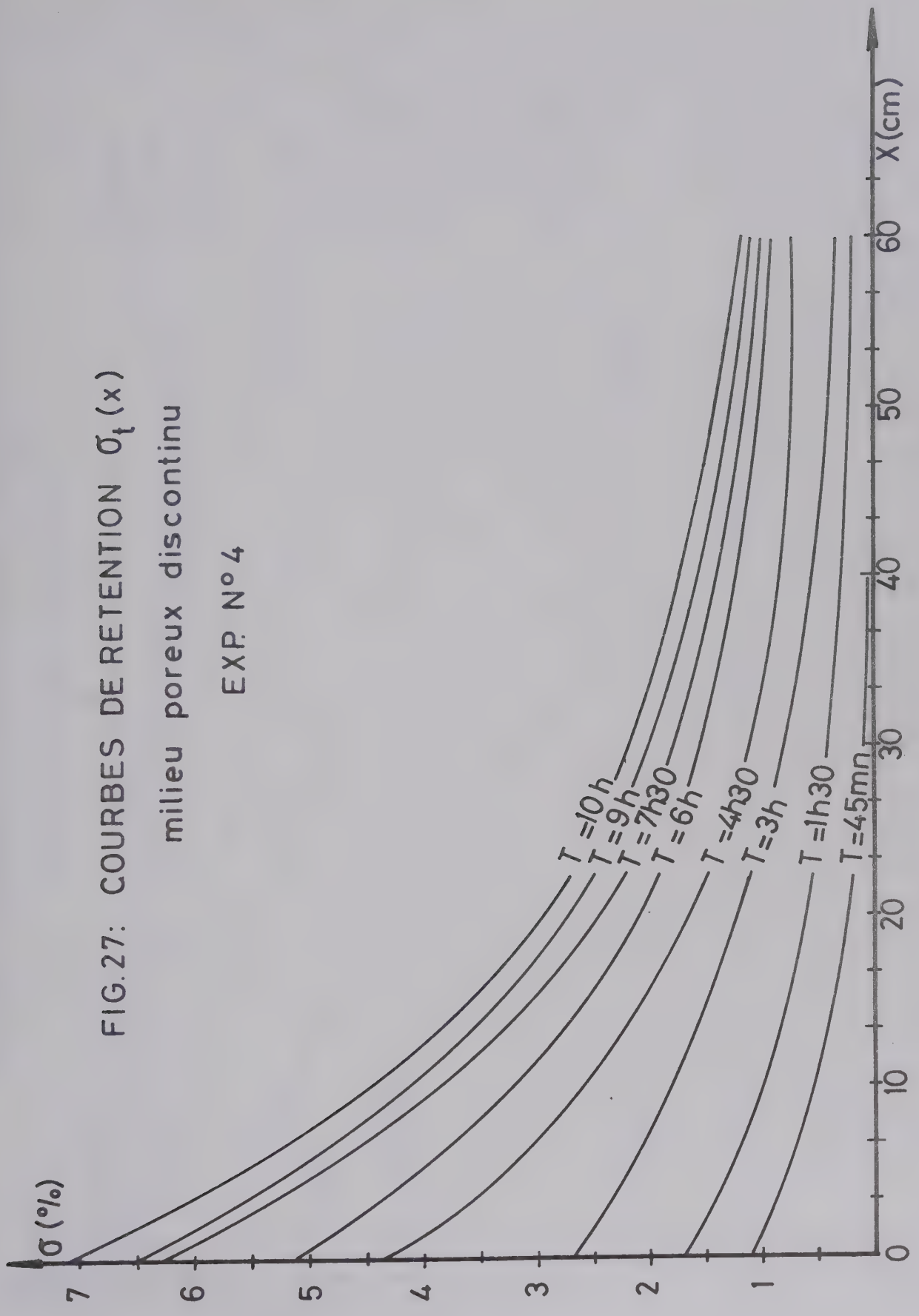


FIG.27: COURBES DE RETENTION $\sigma_t(x)$

milieu poreux discontinu

EXP. N°4

FIG.28 COURBES DE RETENTION $\log \sigma_t(x)$

milieu poreux discontinu

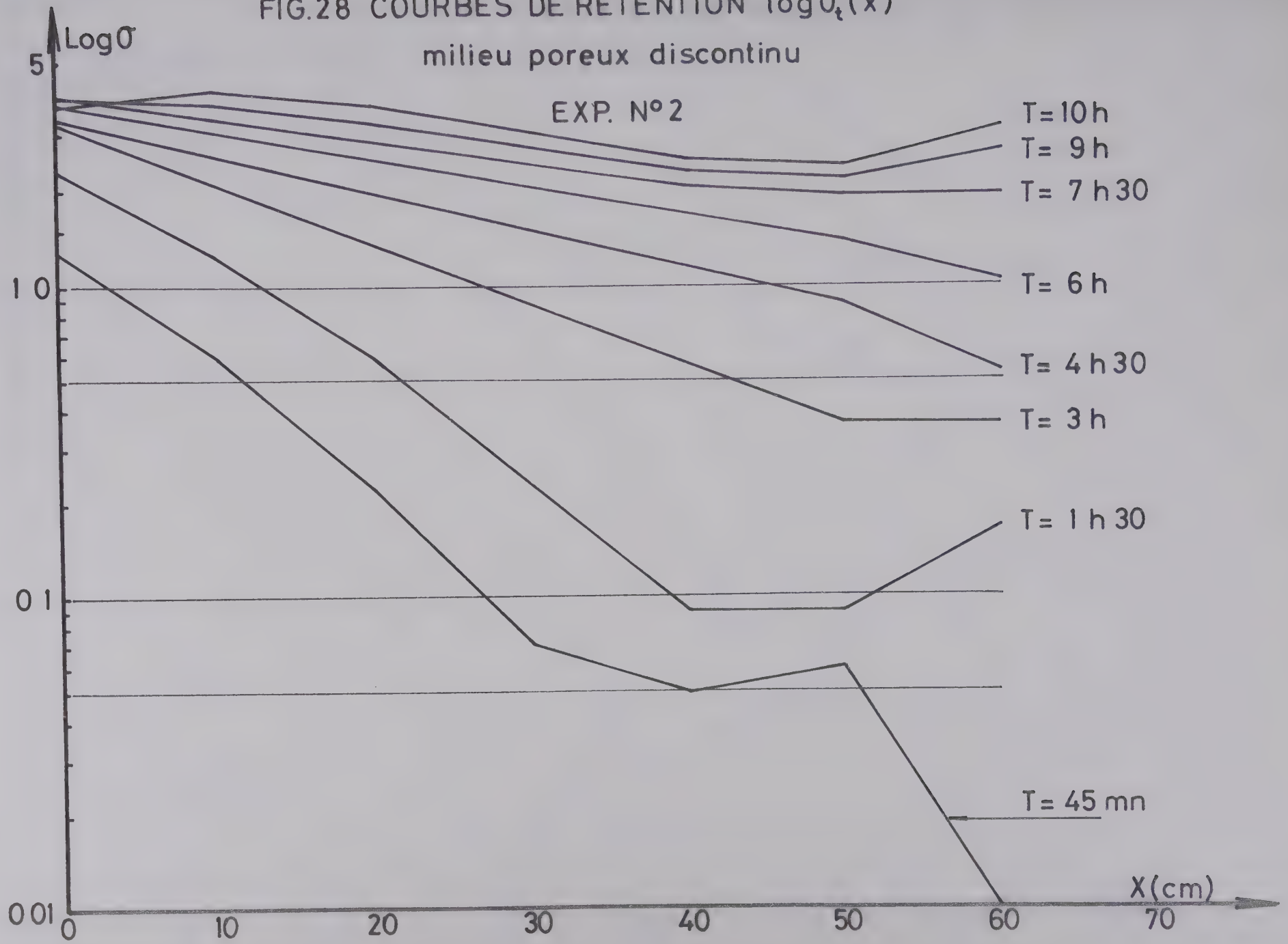
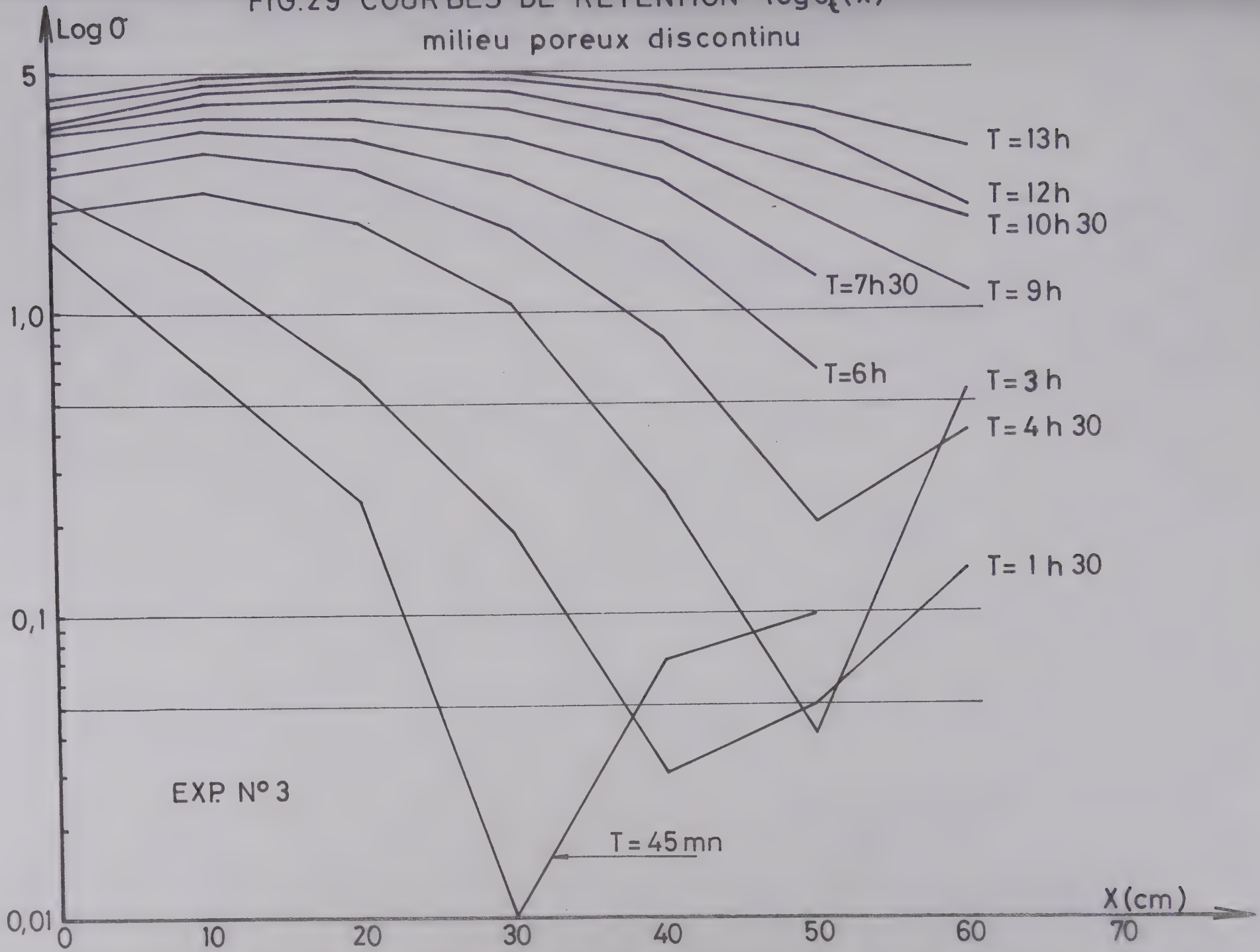


FIG.29 COURBES DE RETENTION $\log \sigma_t(x)$
milieu poreux discontinu



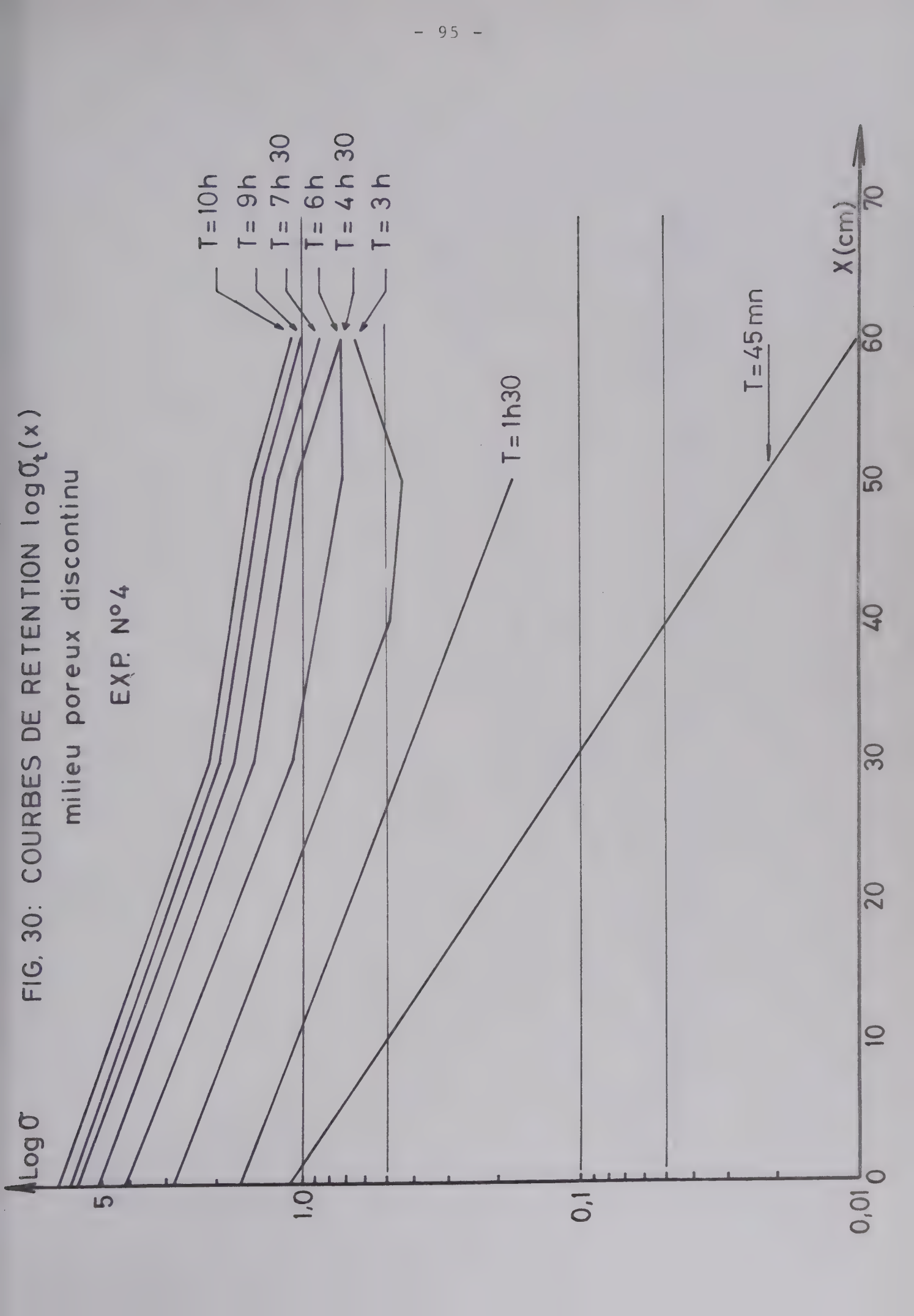


FIG. 30: COURBES DE RETENTION $\log \sigma_t(x)$

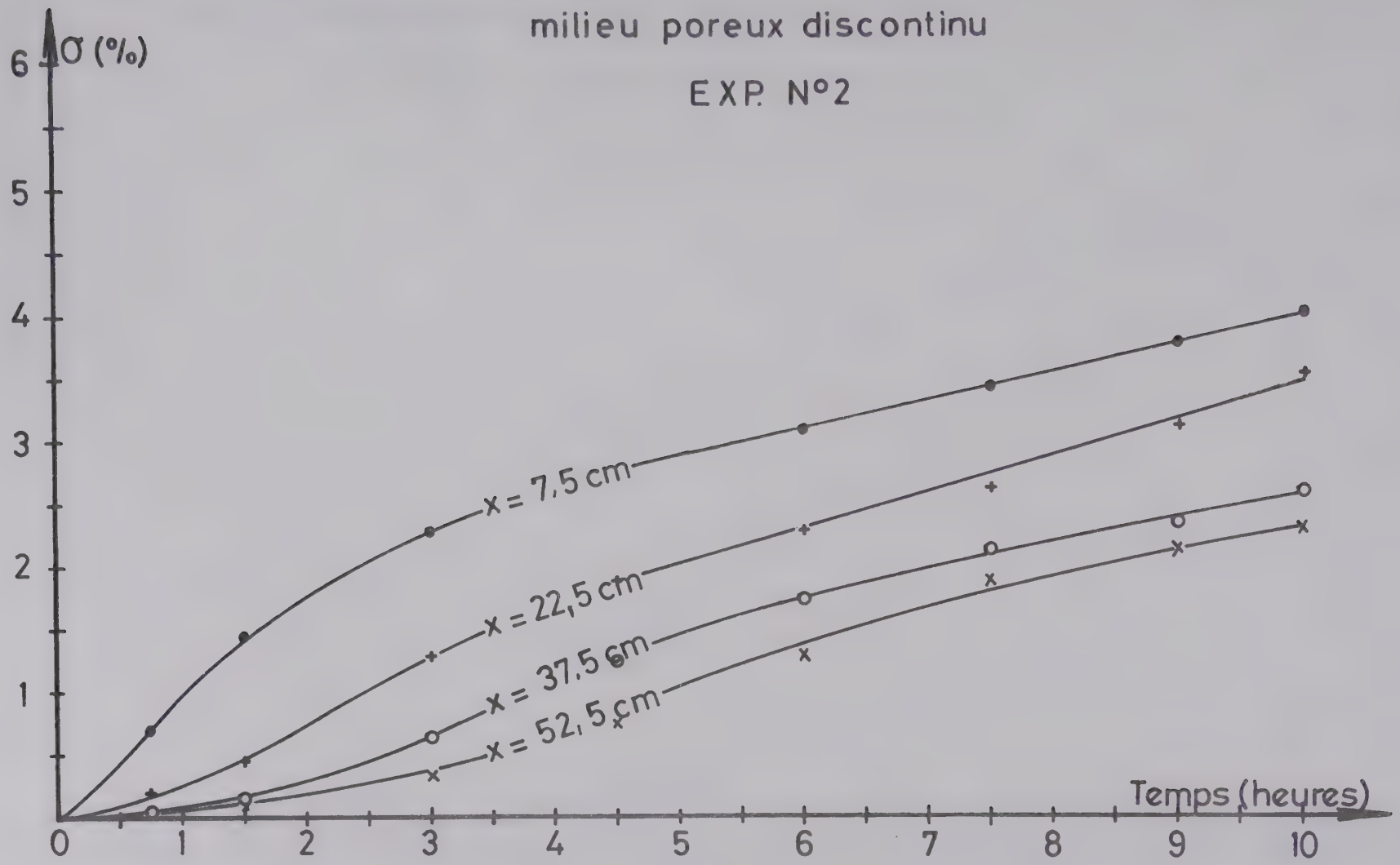
milieu poreux discontinu

EXP. N°4

FIG. 31: COURBES DE RETENTION $\sigma_x(t)$

milieu poreux discontinu

EXP. N°2



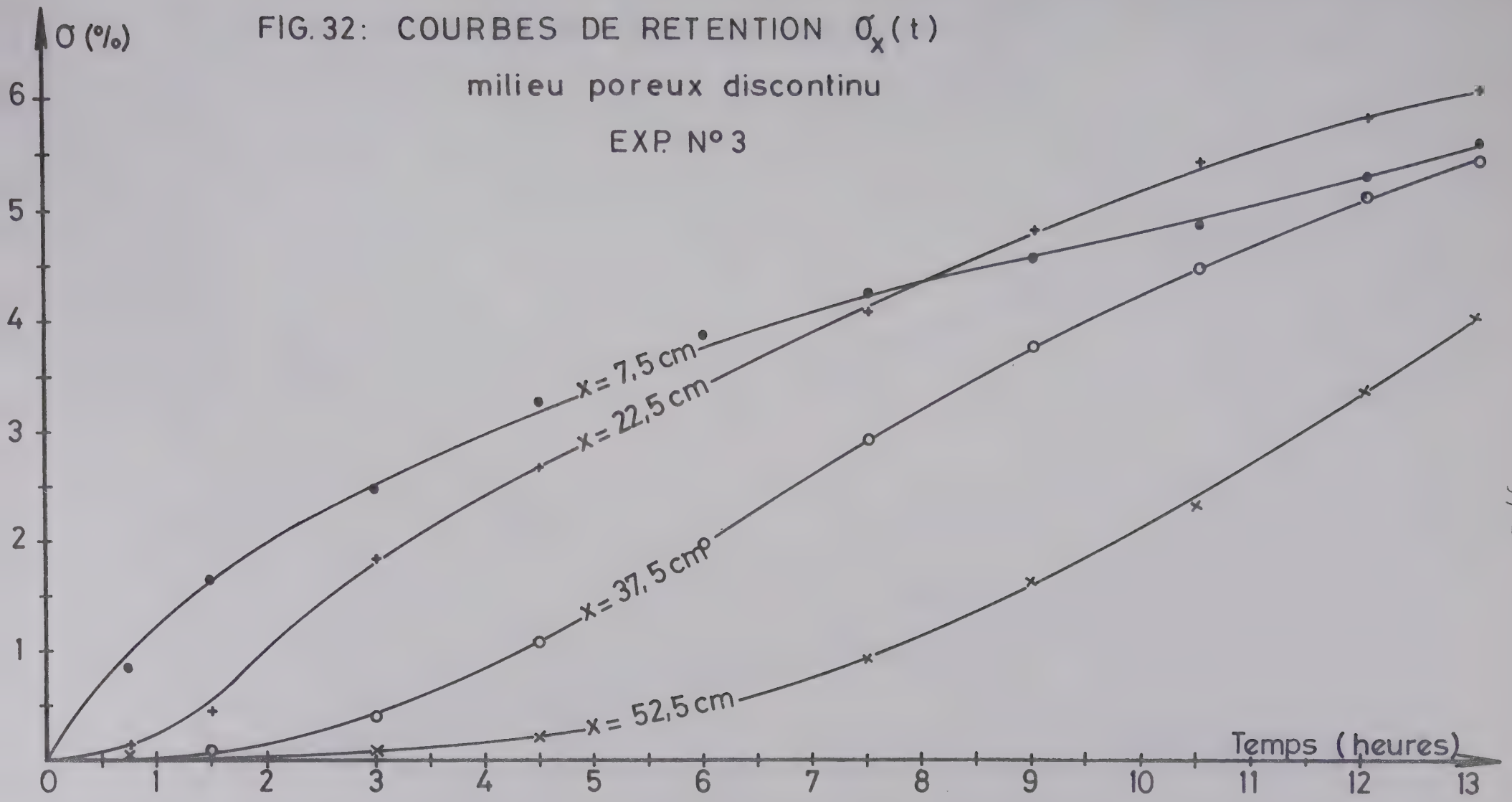
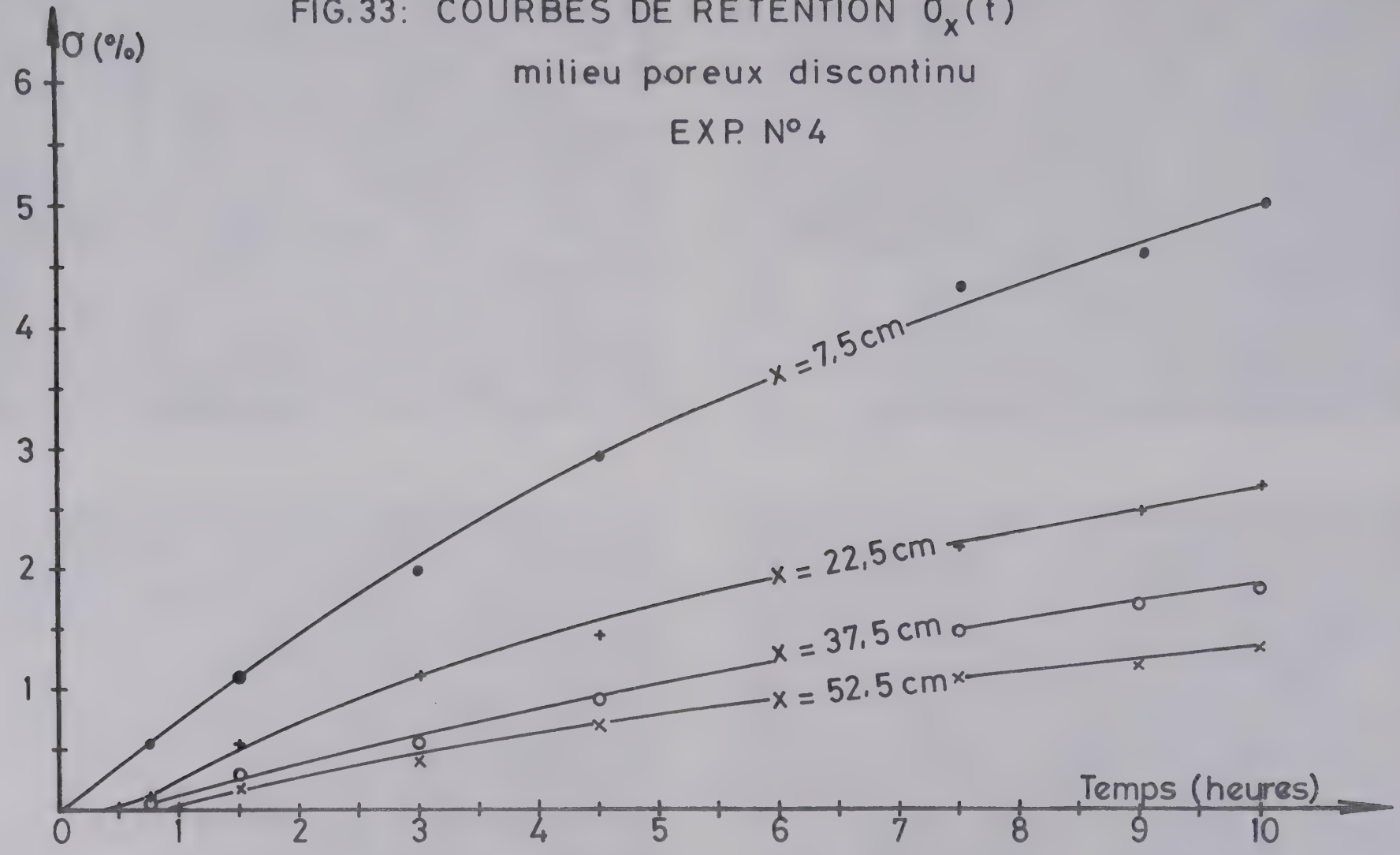

σ (%)
FIG. 32: COURBES DE RETENTION $\sigma_x(t)$
milieu poreux discontinu
EXP. N° 3
x = 7,5 cm
x = 22,5 cm
x = 37,5 cm
x = 52,5 cm
Temps (heures)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

FIG. 33: COURBES DE RETENTION $\sigma_x(t)$

milieu poreux discontinu

EXP. N°4



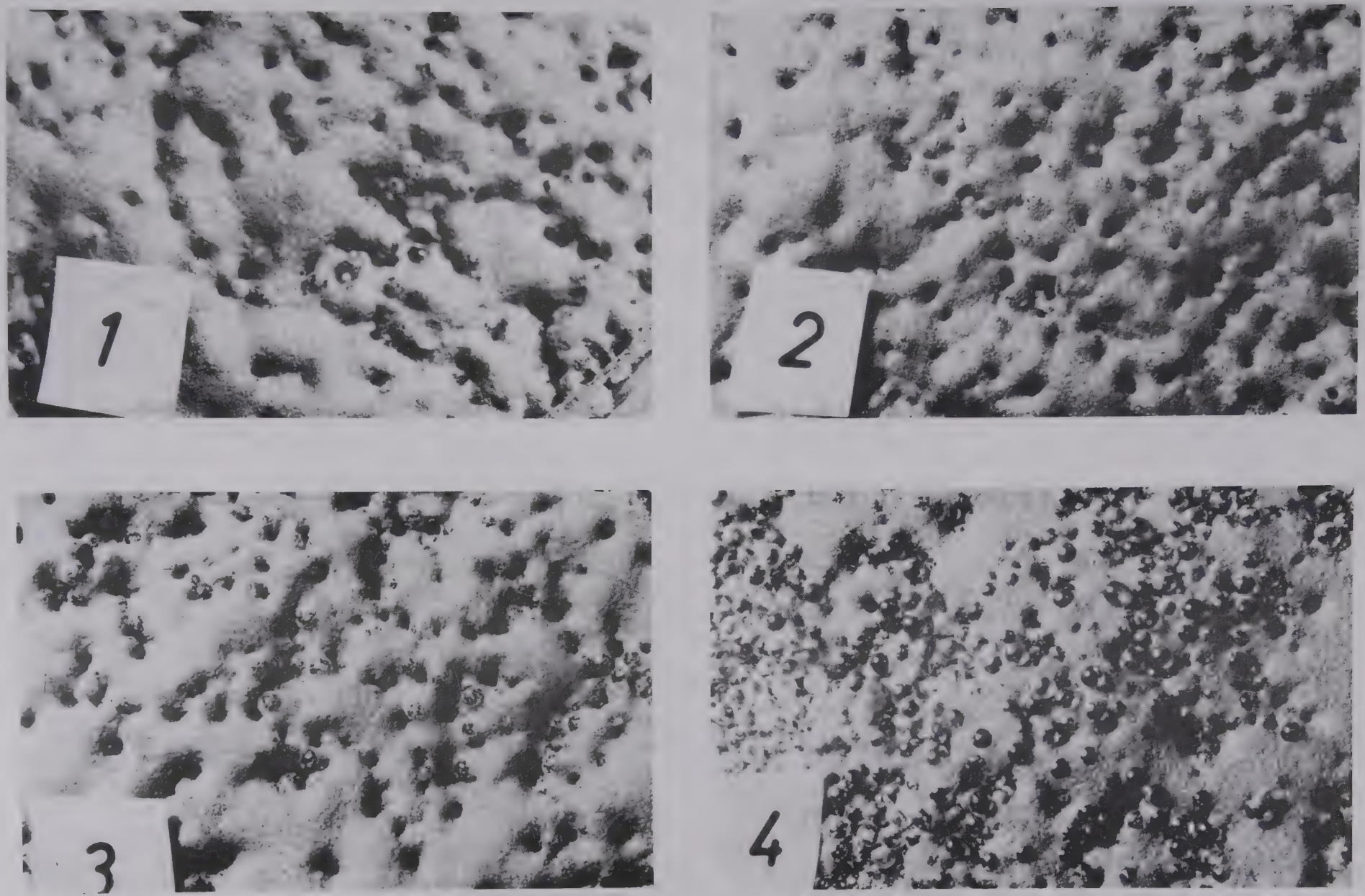
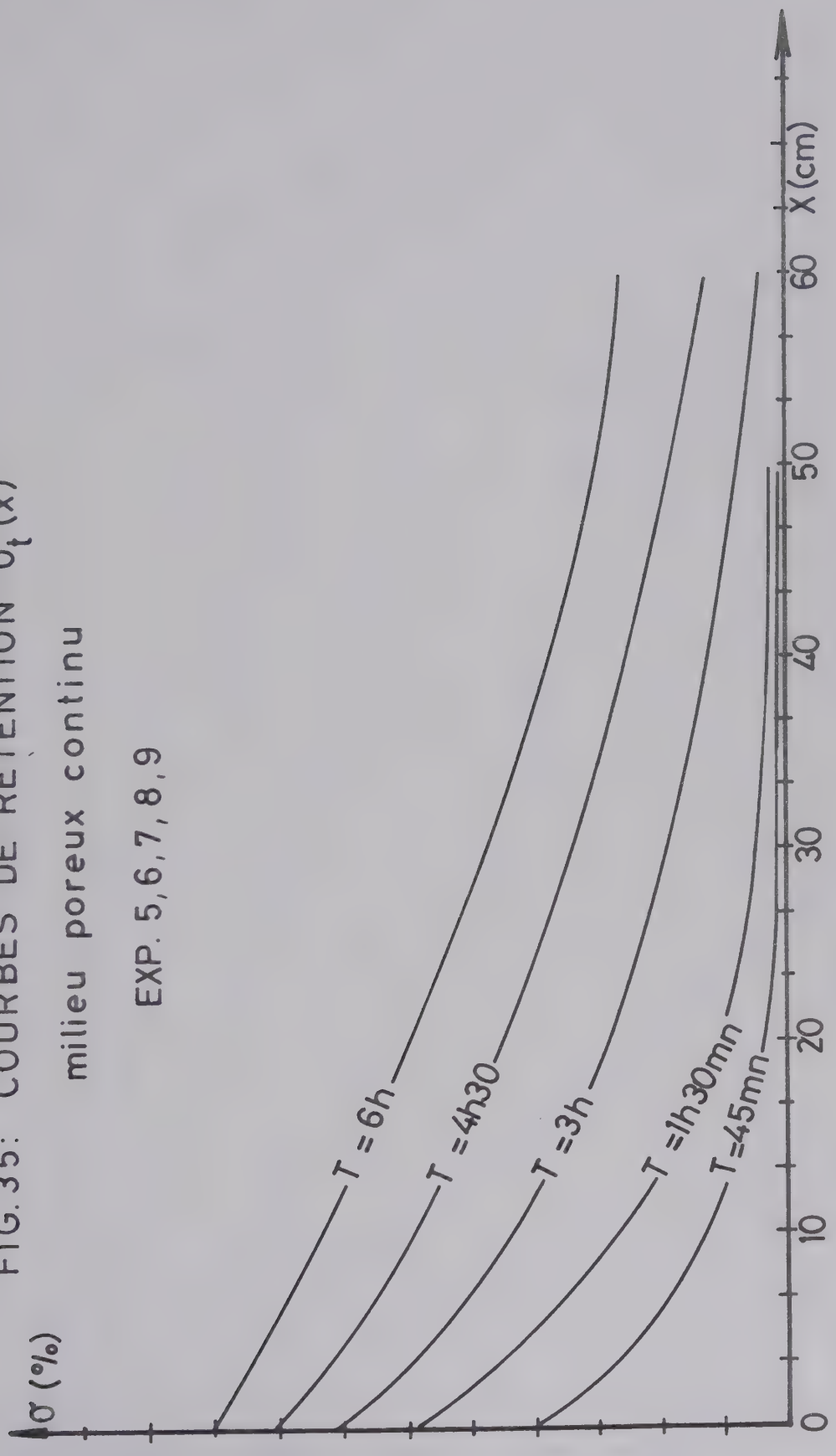


FIG: 34 DEPÔTS OBSERVES SUR LES DIFFERENTES GALETTES

FIG. 35: COURBES DE RETENTION $\sigma_t(x)$

milieu poreux continu

EXP. 5, 6, 7, 8, 9



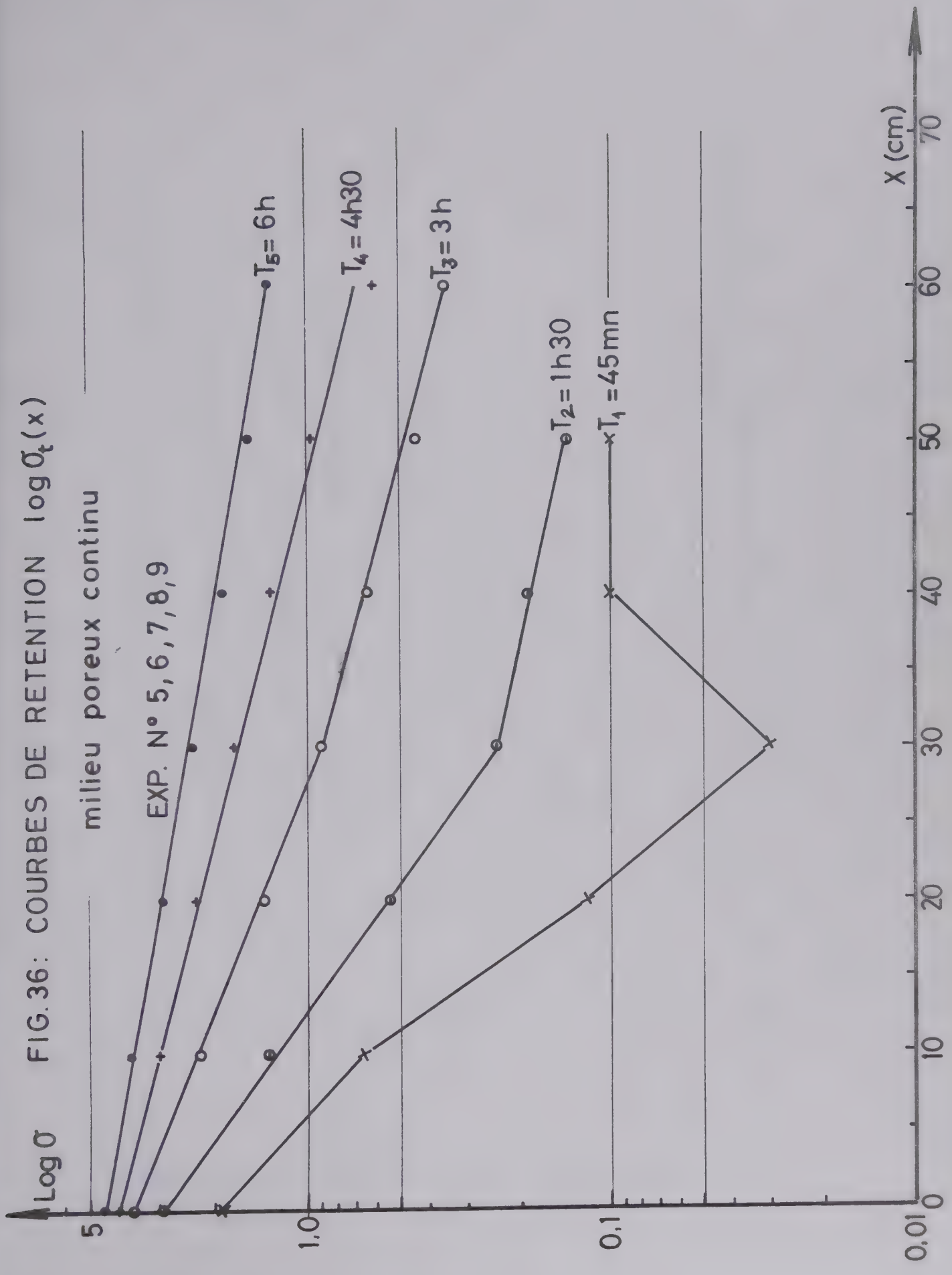


FIG. 36: COURBES DE RETENTION $\log \sigma_t(x)$

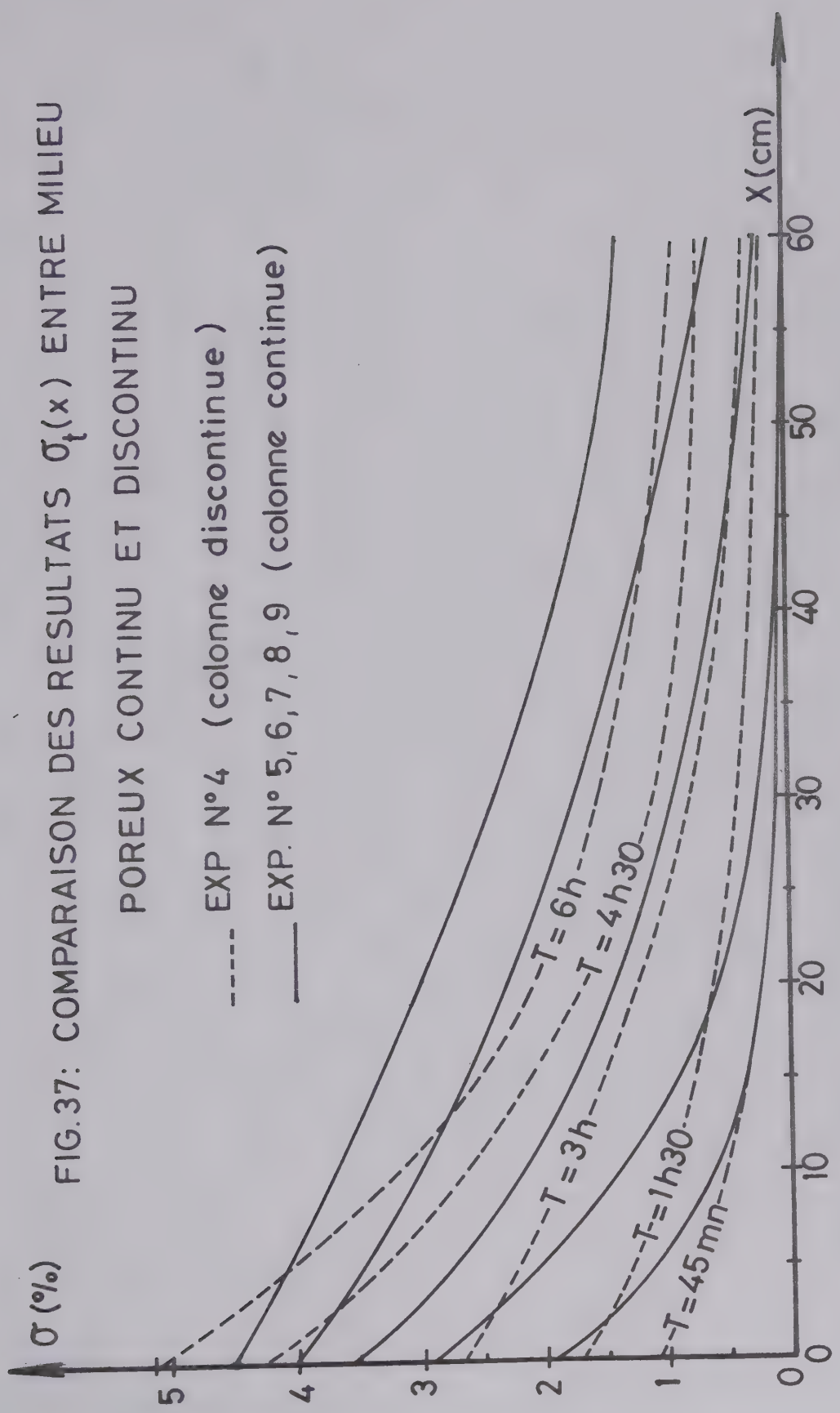


FIG. 37: COMPARAISON DES RESULTATS $\sigma_t(x)$ ENTRE MILIEU POREUX CONTINU ET DISCONTINU

----- EXP N°4 (colonne discontinue)

——— EXP. N° 5, 6, 7, 8, 9 (colonne continue)

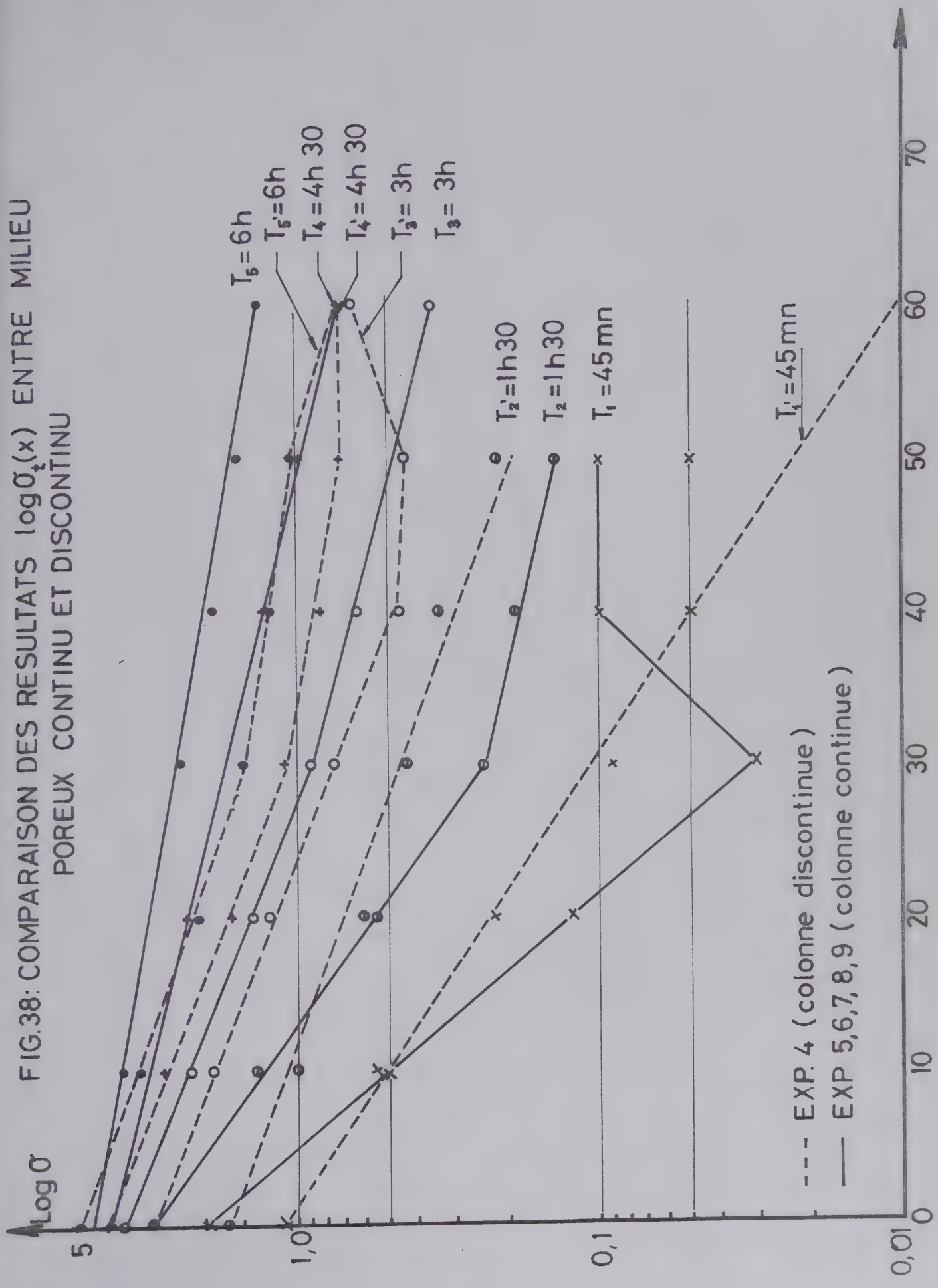
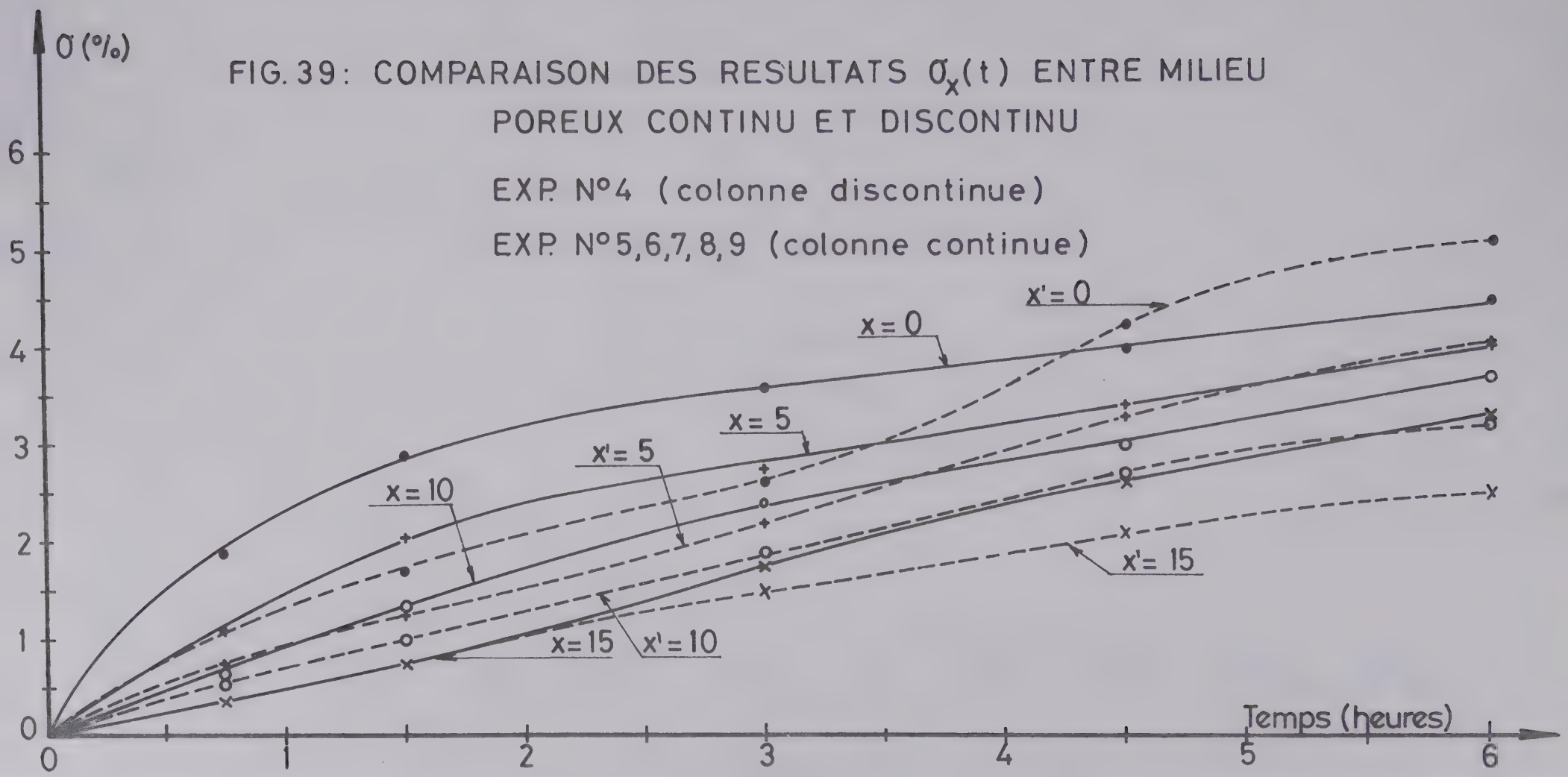


FIG.38: COMPARAISON DES RESULTATS $\log \sigma_t(x)$ ENTRE MILIEU POREUX CONTINU ET DISCONTINU
Log σ
5
1,0
0,1
0,01
0
10
20
30
40
50
60
70
T_5= 6h
T_5'=6h
T_4=4h 30
T_4'= 4h 30
T_3'= 3h
T_3= 3h
T_2'=1h30
T_2=1h30
T_1=45mn
T_1'=45mn
--- EXP. 4 (colonne discontinue)
—— EXP 5,6,7,8,9 (colonne continue)

FIG. 39 : COMPARAISON DES RESULTATS $\sigma_x(t)$ ENTRE MILIEU POREUX CONTINU ET DISCONTINU

EXP. N°4 (colonne discontinue)

EXP. N°5,6,7,8,9 (colonne continue)



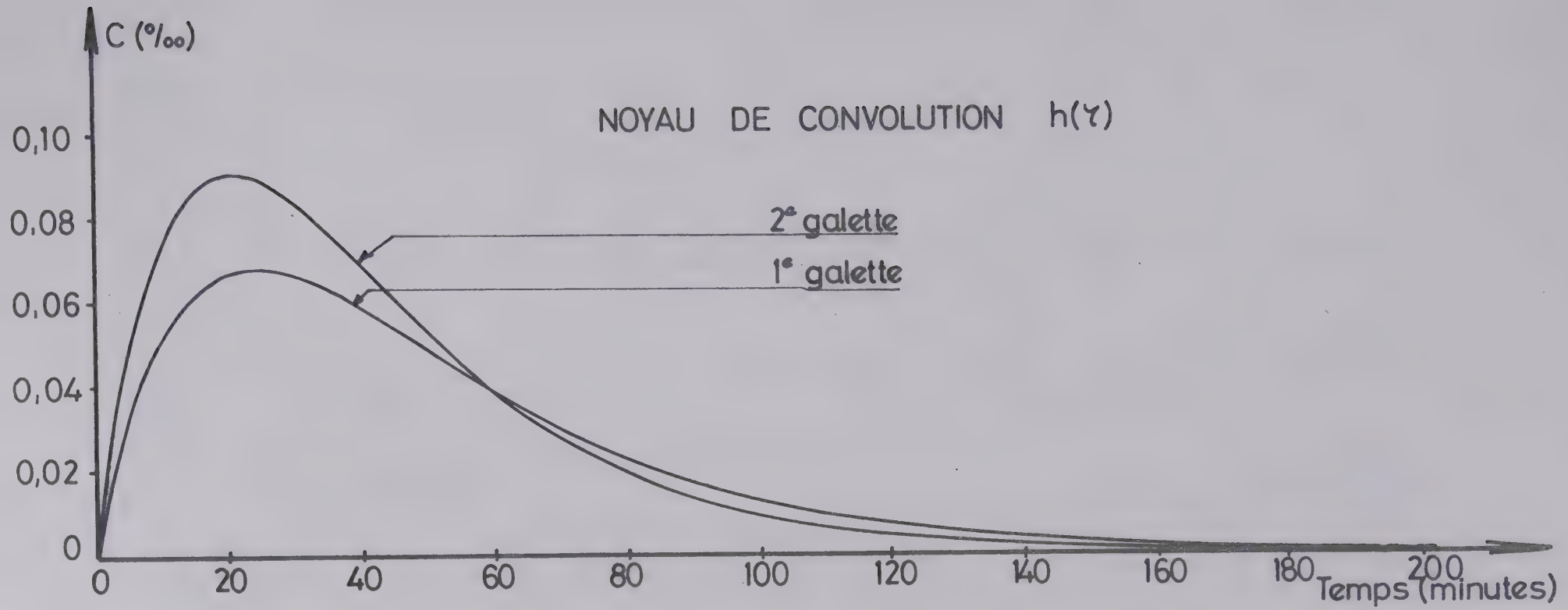

C (‰)
NOYAU DE CONVOLUTION h(τ)
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0
2e galette
1e galette
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
Temps (minutes)

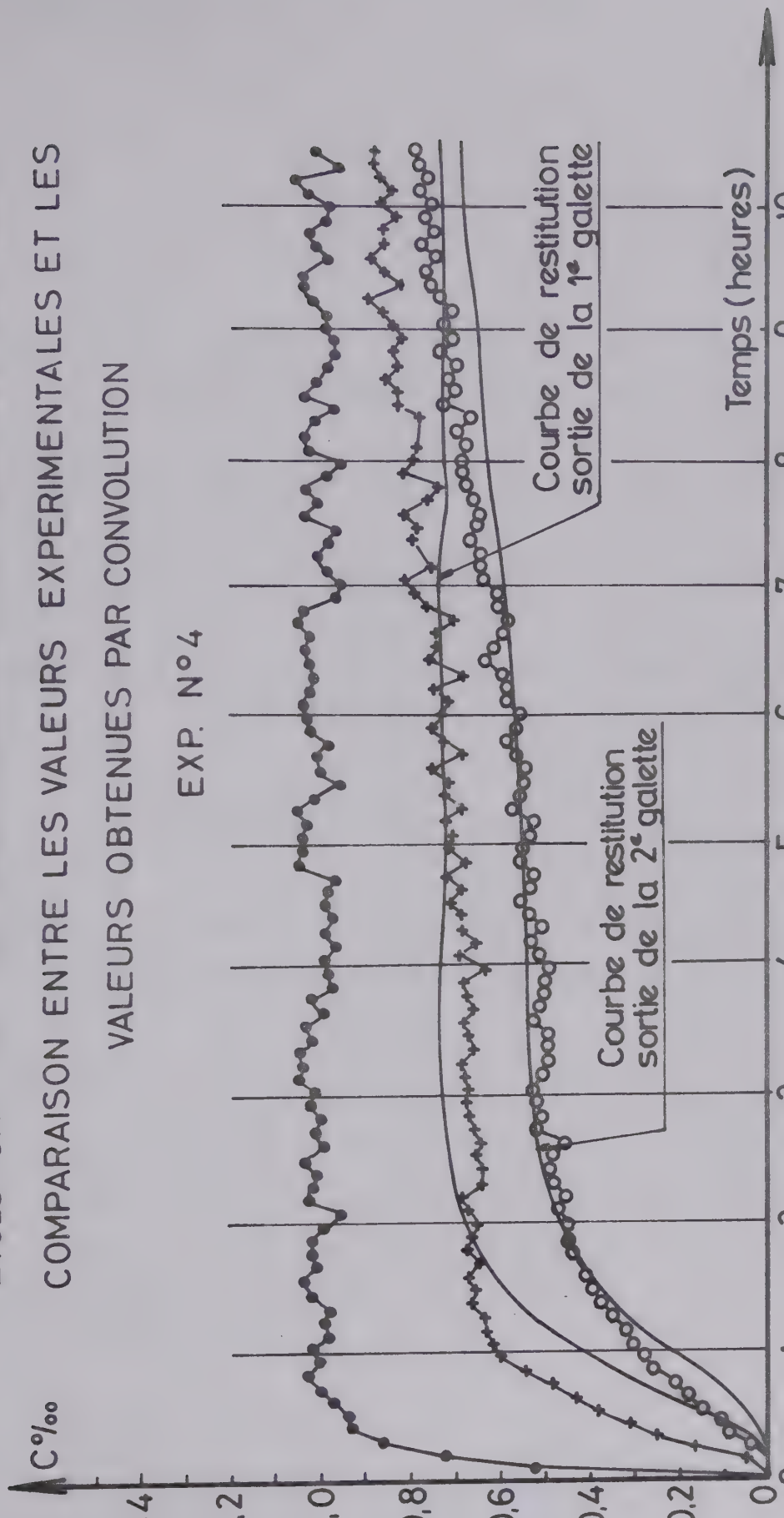
FIGURE: 40

FIG. 41

EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN FONCTION DU TEMPS

COMPARAISON ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS OBTENUES PAR CONVOLUTION

EXP. N°4



INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
DE TOULOUSE

D E C I S I O N

Le Président de l'Institut National Polytechnique de TOULOUSE

VU les dispositions de l'article 11 de l'arrêté du 16 avril 1974 sur le DIPLOME DE DOCTEUR-INGENIEUR

VU le rapport de thèse établi par un des membres du jury

AUTORISE *Monsieur SEMINARIO Carlos*

à présenter une thèse en soutenance pour l'obtention du DIPLOME de DOCTEUR-INGENIEUR devant un jury composé de :

M. *DAT, Professeur à l'I.N.P.T.* — Président

M. *BORIE, Maître de recherche CNRS*
M. *CURIE, Ingénieur Enseignement Supérieur*
M. *DEGALLIER, Ingénieur au BRGM à Orléans*
M. *PIQUEMAL, Directeur de recherche CNRS*
M. *THIRRIOT, Professeur à l'I.N.P.T.*

— Membres

A TOULOUSE, le *28 juin 1979*
Le Président de l'I.N.P.T.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE
MINISTÈRE DES UNIVERSITÉS

Professeur G. MONTEL